

Universidad Carlos III de Madrid



Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

Alumno: Alejandro Javier Pérez Salido

Tutor: David Varas Doval

Departamento de Mecánica de Medios Continuos
y Teoría de Estructuras

AGRADECIMIENTOS

La realización de este proyecto ha sido un largo trabajo en solitario salpicado de la colaboración unos pocos y del apoyo de muchas personas.

En especial quiero agradecerse a las personas más cercanas de mi entorno. La importancia de un puente parte de los cimientos. A mis padres por brindarme amor, un hogar y mi educación, a mi hermano Iván por seguir mis pasos haciendo que no me detenga y a Patricia por su apoyo y paciencia, su compañía y la felicidad que me ha aportado durante todo este tiempo. Os lo agradezco de verdad. También quisiera agradecer el interés y el apoyo mostrado por mis (mas que) primos-hermanos y tíos que demuestran que una familia abarca varias casas.

También quisiera agradecerse especialmente a mi tutor, David, por su apoyo, paciencia y dedicación. Siempre ha tenido una respuesta positiva a todos los problemas que yo encontraba, y no ha tenido reparos en ayudarme en todo lo que le he pedido. Gracias David por responder al paradigma de tutor.

Por otro lado quisiera agradecer a José Luis y a Pedro, excompañero y jefe respectivamente, por aportarme los conocimientos necesarios para llevar más allá este trabajo, amén de enseñarme la peculiar belleza de este mundo y la realidad que vive un ingeniero en el día a día.

Para ir acabando, quiero dar las gracias por su apoyo a todos los amigos que estuvieron, están y deseo fervientemente que estén ahí. Cada uno en su momento y cada uno en su medida pero todos habéis sido importantes: Andrea, Lorena, Víctor, Luises, Pablos, Javis, Bruno, Kike, Jorge, Nacho, Césares, Joses, Julios, Jesús, Martas, Elena, Anas, Raquel, Danieleles, Rubenes, y muchos más que no por no mencionarlos no sois menos importantes, sólo que no me llega vuestro brillo ahora.

Y, finalmente, gracias a mis abuelos, los 4, tanto yayos como abuelos. Porque me niego a pensar que os hayáis ido, porque cada uno a su manera me habéis mostrado que fuisteis unos luchadores, porque sé que seguís velando por mí, porque nunca tuve suficiente de vosotros y porque aún hoy, años después, sigo emocionándome cuando me acuerdo de vosotros.

A todos, muchas gracias.

Alejandro J. Pérez Salido

CONTENIDO

Agradecimientos.....	3
1 Presentación.....	7
2 Introducción y objetivos.....	8
2.1 Objetivos.....	8
3 Estado del arte.....	9
3.1 Análisis por elementos finitos.....	9
3.1.1 Aplicación del método.....	9
3.2 Interacción fluido-estructura: FSI.....	14
3.2.1 Multi-material arbitrary lagrangian eulerian (ale-mmale).....	15
3.2.2 Smooth particle hydrodynamics (sph).....	17
3.3 Cronología.....	18
CASO 1: EXPERIMENTAL STUDY ON THE WATER IMPACT OF A SYMMETRICAL [...].....	19
CASO 2: CRASH ON WATER: A MULTY-PHYSICS PROBLEM.....	21
4 Modelización numérica.....	22
4.1 Caso de interacción cuña y agua, empleando ALE y combinación [...].....	22
4.1.1 MODELO EN ELEMENTOS FINITOS.....	22
4.1.2 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS.....	41
4.1.3 CONCLUSIONES.....	62
5 Modelo de amerizaje.....	64
5.1 Ditching.....	64
5.1.1 MODELO EN ELEMENTOS FINITOS.....	64
5.1.2 ESTUDIO DE RESULTADOS.....	67
5.1.3 CONCLUSIONES.....	80
6 Conclusiones y futuros trabajos.....	82
6.1 Conclusiones extraídas del presente trabajo.....	82
6.2 Futuros trabajos.....	82
7 Bibliografía.....	83
8 Anexo: códigos de cálculos.....	84
8.1 Código tipo para un caso de cuña mediante ale.....	84
8.2 Código tipo para un caso de amerizaje mediante sph.....	88

ESTUDIO DEL AMERIZAJE DE UNA AERONAVE USANDO LS-DYNA

1 PRESENTACIÓN

Mediante este proyecto será estudiado un caso de amerizaje de emergencia de una aeronave, en inglés *ditching*. Para desarrollar este estudio, se emplearán dos métodos de aproximación diferentes, en concreto, tecnologías de *interacción fluido-estructura* (FSI): ALE (Arbitrary Lagrange Eulerian) y SPH (Smooth Particle Hydrodynamics). Previamente al modelizado del amerizaje se establecerá una comparativa entre ambos métodos; se contrastarán con los datos de un ensayo experimental, este consiste en el impacto de un perfil angular sobre agua -se atenderá a la precisión y al tiempo de resolución del caso especialmente-, una vez destacada una solución, se procederá al procesado del modelo de *ditching* basándose en las experiencias previas, y, finalmente, se buscará una optimización del modelo.

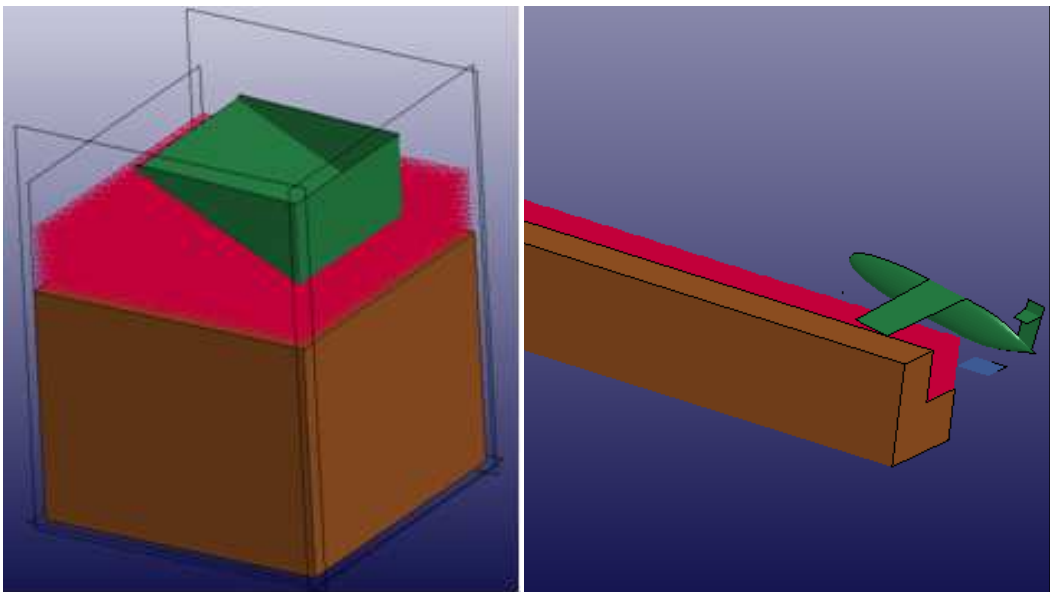


Figura 1 Cuña y amerizaje

2 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Dentro del panorama actual, en el cual toda acción está marcada por su coste económico, el cálculo de eventos mediante la técnica de elementos finitos es esencial para optimizar la relación coste-resultados.

En investigación y diseño, el investigador se encuentra frecuentemente con problemas definidos por ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Es ahí donde entra el empleo de métodos numéricos. Esta técnica busca la resolución de una ecuación diferencial a través de resoluciones iterativas de la misma; la manera de resolverlo es buscando una convergencia en resultados correlativos. Una manera de resolver iterativamente una ecuación diferencial es a través del 'Método de los Elementos Finitos'.

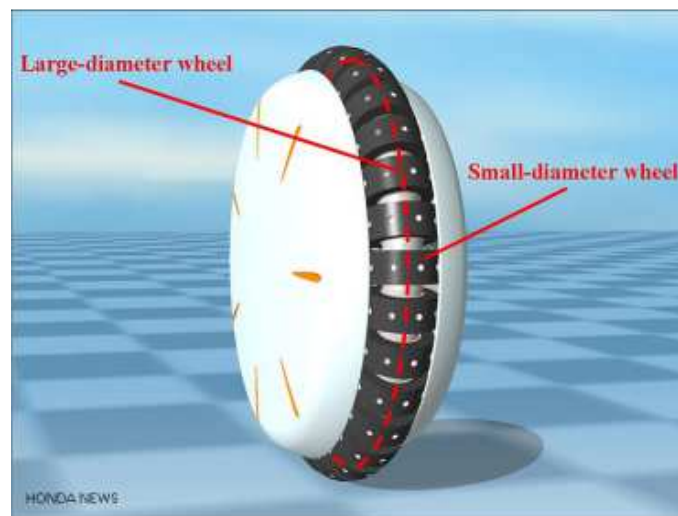


Figura 2 Ejemplo de diseño, cortesía de Honda Inc.

2.1 OBJETIVOS

1. Determinar un ensayo real, que sirva como patrón de un caso de interacción entre un sólido y un fluido.
2. Diseñar, mediante asistencia de un ordenador, un modelo numérico del ensayo para ser simulado por el software comercial LS-DYNA®.
3. Contrastar los datos de la simulación con los datos reales del ensayo.
4. Validar el modelo.
5. Extrapolar la experiencia recogida gracias al modelo, con esto se diseñará un nuevo modelo numérico que represente un amerizaje de emergencia.
6. Simular el modelo de amerizaje mediante LS-DYNA®.
7. Comparar los resultados con los de una simulación homóloga en lenguaje PAM-CRASH® y datos reales.
8. Validar el modelo de LS-DYNA®.
9. Determinar las conclusiones extraídas de la validación de ambos modelos de LS-DYNA®.
10. Exponer futuras líneas de investigación a partir del presente proyecto.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS.

El análisis por elementos finitos es una técnica que consiste en la aplicación del método de los elementos finitos (*FEM* en sus siglas en inglés) para la resolución de un problema físico determinado a través del planteamiento y resolución de complejas ecuaciones algebraicas.

- El problema físico vendrá definido por diversas ecuaciones diferenciales que englobaran los diferentes aspectos del cálculo y por ecuaciones de contorno que delimiten el problema.
- Tomando esto debe ser posible formular el caso como una relación de variables independientes.
- El método busca dividir el caso en regiones pequeñas que faciliten el cálculo de las variaciones en dichas regiones. Las variaciones combinadas en estos dominios menores darán lugar a las variaciones globales del caso.
- El problema físico se definirá a partir de la reformulación de ecuaciones diferenciales en variables y las relaciones entre sí. Esto dará lugar a un sistema de N ecuaciones, siendo N un número entero y finito. La aproximación con la realidad será mayor cuanto mayor sea el número de estas ecuaciones.

De este modo se consigue la conversión al sistema de ecuaciones algebraicas resolubles por el software de computación y delimitado por las condiciones que el usuario precise dentro del teórico campo vectorial.

3.1.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO

El método se emplea en resolver numéricamente ecuaciones diferenciales, que definen el caso, mediante una transformación algebraica. Partiendo de este punto se establece que lo que se conseguirá será una aproximación del comportamiento real o esperado. Las ecuaciones diferenciales sólo relacionan entre sí los nodos de la malla reticulada. Los valores de las distintas variables que se puedan obtener de los elementos será una interpolación de mayor o menor precisión de los valores de dichas variables en los nodos que lo componen. De ahí que no se pueda garantizar la exactitud de los valores fuera del entorno nodal.

Para conseguir este objetivo se establecen unas pautas de actuación en todo problema o 'caso' a resolver:

1. Preprocesado
2. Cálculo
3. Postprocesado

1. Pre-procesado

El método busca resolver un problema continuo mediante la aproximación que resulta de dividirlo en partes virtuales, esto es 'discretización', tal y como muestran los ejemplos de la Figura 3 de manera que:

- El medio continuo se divide en un número finito de 'elementos'. Estos elementos se encuentran acotados mediante unos puntos, llamados 'nodos', que definen la

distribución de dicho elemento en el entorno y a través de los cuales se introducen las variables del problema. Estos nodos serán el nexo de unión entre un elemento y sus elementos adyacentes.

- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las 'funciones de forma'.
- Las incógnitas del problema pasan a ser expresadas como la relación entre los nodos de un elemento según lo exprese las funciones antes mencionadas.
- La solución del problema completo será la aproximación resultante del ensamblado de cada una de las soluciones parciales en los elementos del problema.

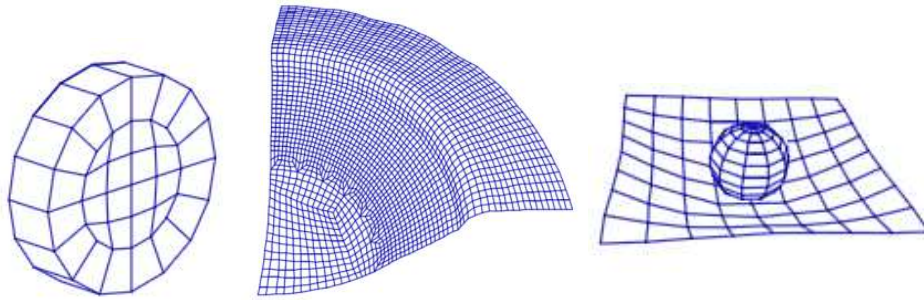


Figura 3 Ejemplos de discretización

Dicho lo cual, se entiende que la precisión del modelo virtual está fuertemente supeditada a la calidad de mallado y a la definición correcta de las variables que envuelven al problema. Otro aspecto a destacar es la rotunda conexión de esta herramienta de resolución a un sistema de computación de capacidades de memoria y procesamiento elevadas.

2. Cálculo

Una vez traducido el problema en un lenguaje comprensivo para el software de procesado, éste tratará de resolverlo según las pautas establecidas en el pre-procesado, marcadas por el usuario.

Según la naturaleza del cálculo y la previsión que se tenga del desarrollo del caso, se utilizará un tipo concreto de cálculo.

- Si se trata de un caso de dinámica relativamente sencilla pero ejecutada en un periodo largo de tiempo, se puede emplear cálculo implícito, Figura 4; este cálculo, resuelve iterativamente problemas matriciales del tipo:

$$\{f_n\} = [K_{n \cdot n}] \cdot \{d_n\}$$

Ecuación 1

Donde f son las cargas aplicadas en los nodos, K la matriz de rigidez y d los desplazamientos resultantes en los nodos.

Toma las soluciones iteradas dentro de un intervalo de tiempo, buscando un factor de convergencia que dé por válida la solución obtenida mediante la resolución de la ecuación matricial. Esta matriz se debe montar en cada iteración por completo por lo que este tipo de cálculo conlleva mallas relativamente pequeñas que puedan alojarse en una única máquina para evitar dividir la matriz de rigidez.

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

Este es el tipo de cálculo óptimo para resolver casos que presenten pequeños gradientes en las variables durante grandes períodos de tiempo.

```
BEGIN implicit dynamics time step      14
=====
              time =  1.00000E+00
      current step size =  4.61258E-02
Iteration:   1      *|du|/|u| =  3.9896003E-02      *Ei/E0 =  1.9594395E-01
Iteration:   2      *|du|/|u| =  3.7821265E-02      *Ei/E0 =  7.6283784E-02
Iteration:   3      *|du|/|u| =  1.1354565E-02      *Ei/E0 =  1.7280999E-02
Iteration:   4      *|du|/|u| =  8.1805623E-04      *Ei/E0 =  1.6528364E-03

Equilibrium convergence summary for time step      14 at time =  1.0000000E+00
```

Figura 4 Captura de un cálculo implícito

Por otro lado, existe el cálculo explícito, Figura 5, que resuelve el problema empleando resoluciones de ámbito energético, como el método de los trabajos virtuales. Al ser de naturaleza energética es el cálculo apropiado para resolver problemas de acoplado entre fluido y estructura, como el que da lugar a este documento.

Este tipo de cálculo permite el tratamiento por separado de tal manera que permite paralelizar el cálculo en distintas máquinas, no está tan supeditado al número de elementos como al tamaño de éstos. Cuanto más pequeño, menos tiempo emplea el sonido en recorrer el elemento, ese tiempo (denominado Δt_{cr}) será el que se atenderá al resolver las ecuaciones y definir las variaciones en los nodos, por ello, cuanto menos tiempo se emplee por ciclo, más ciclos de cálculo necesitará para alcanzar el tiempo establecido en la resolución. No converge la solución, ya que, mientras se defina en un intervalo menor a Δt_{cr} , esa solución es estable, según la *condición de Courant*. Este tipo de cálculo es el empleado en impactos, detonaciones o casos físicos que conlleven gran cantidad de energía en breves períodos de tiempo.

```
estimated total cpu time      =  621994 sec (  172 hrs 46 mins)
estimated cpu time to complete =  621636 sec (  172 hrs 40 mins)
estimated total clock time    =  827595 sec (  229 hrs 53 mins)
estimated clock time to complete =  825902 sec (  229 hrs 25 mins)
  1 t 0.0000E+00 dt 1.97E-06 flush i/o buffers
  1 t 0.0000E+00 dt 1.97E-06 write d3plot file
 508 t 9.9904E-04 dt 1.97E-06 write d3plot file
1015 t 1.9981E-03 dt 1.97E-06 write d3plot file
```

Figura 5 Captura de un cálculo explícito

3. Post-procesado

Tras el cálculo del problema generalmente los 'solver' devuelven una gran cantidad de información obtenida del proceso. Mucha de esa información ha tenido que ser requerida previamente en el pre-proceso y una vez obtenida se debe transformar y traducir a formatos adecuados, tal es así con histogramas o tablas de resultados. Esta información es la que va a apoyar las conclusiones del estudio, de tal modo es conveniente saber qué clase de información va a devolver el programa y cómo se puede convertir en los datos buscamos.

Lo habitual es emplear programas de *renderizado*, enfocados al tratamiento de imágenes y gráficas, los cuales serán los vehículos más utilizados para exponer los resultados. Estos programas emplean recursos en elevar la calidad de las imágenes, suavizando contornos,

realizando bordes y adecuando nuestras imágenes a formatos de video habituales. Por otro lado también es muy importante que el programa de post-procesado pueda trabajar con gráficas utilizando los datos recopilados.

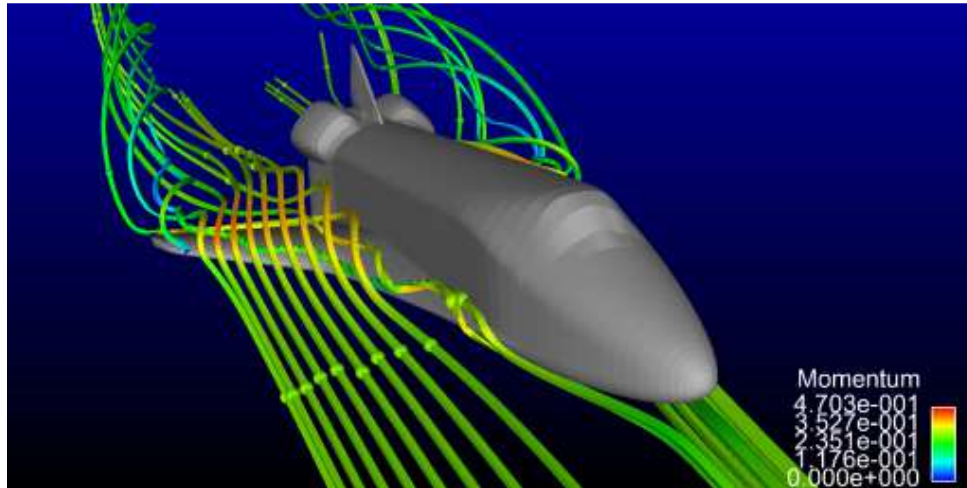


Figura 6 Resultado de post-procesado, estudio del flujo en una aeronave

Los productos más comunes que nos proporciona el post-procesado son los siguientes:

- Un vídeo del desarrollo del caso: Se recogen las secuencias o pasos que el solver ha creado y se monta un video con ellas para ver cómo se desarrolla la simulación. Habitualmente se complementa con un mapa de variables, que colorea regiones según rangos de la variable; hay muchas opciones, las más habituales son desplazamientos, velocidades o tensiones en los elementos.

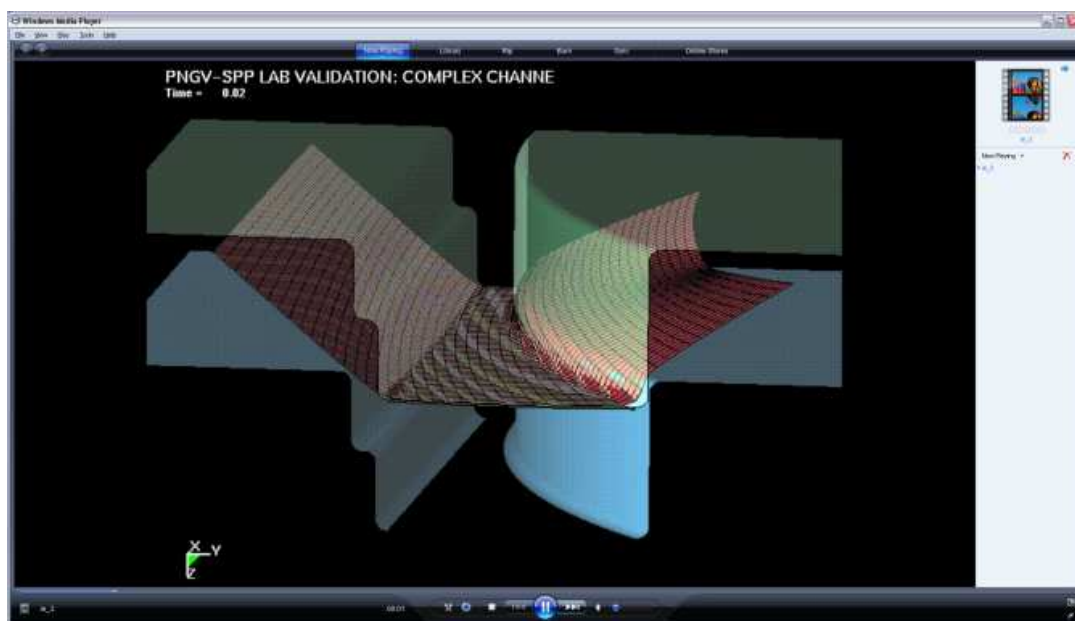


Figura 7 Vídeo de post-procesado de un conformado

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

- Captura de imágenes: Buscan el detalle, se enfocan en regiones concretas que, por sus circunstancias, tienen predisposición a tener valores críticos y por ello se emplean para demostrar, en un instante concreto, un valor sobresaliente con un mapa variacional determinado, Figura 8. Ejemplos de esto pueden ser tensiones en una soldadura, picos de deformación en un impacto, entre otros.

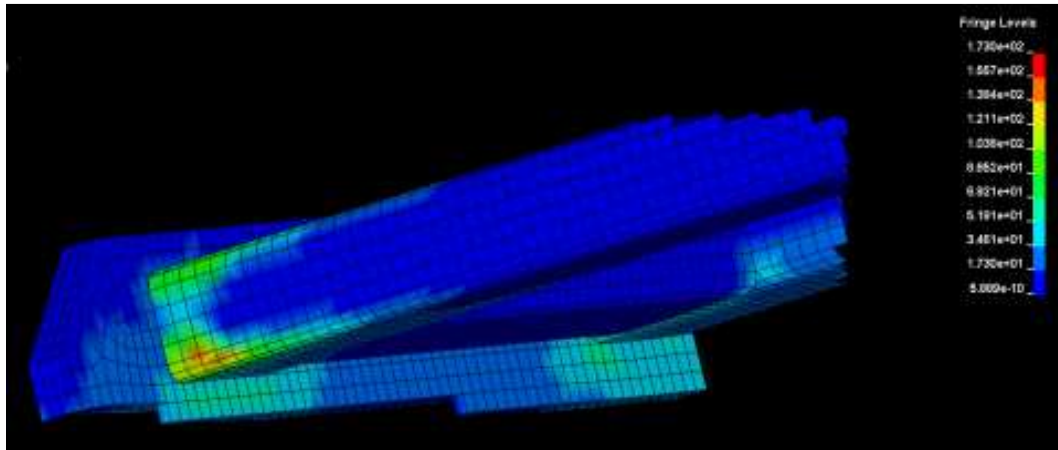


Figura 8 Mapa tensional de un bastidor

- Gráficas: Aquí se engloba tanto una dispersión de datos como un histograma a lo largo del tiempo del caso, Figura 9. Como ya se ha comentado antes, los mapas de variables, Figura 8, devuelven leyendas de colores, acotadas según rangos, por lo que siempre va a haber falta de precisión en los valores visualizados. Por ello, si se quieren saber valores precisos, será conveniente tomar nodos o elementos, que nos devuelvan los valores que se calcularon en ellos. Conviene recordar que los valores que presente un elemento será una extrapolación de los valores de sus nodos; esto se tendrá que tener en cuenta a la hora de analizar gráficas de elementos en los que los valores expuestos serán una transformación estadística de sus fuentes nodales.

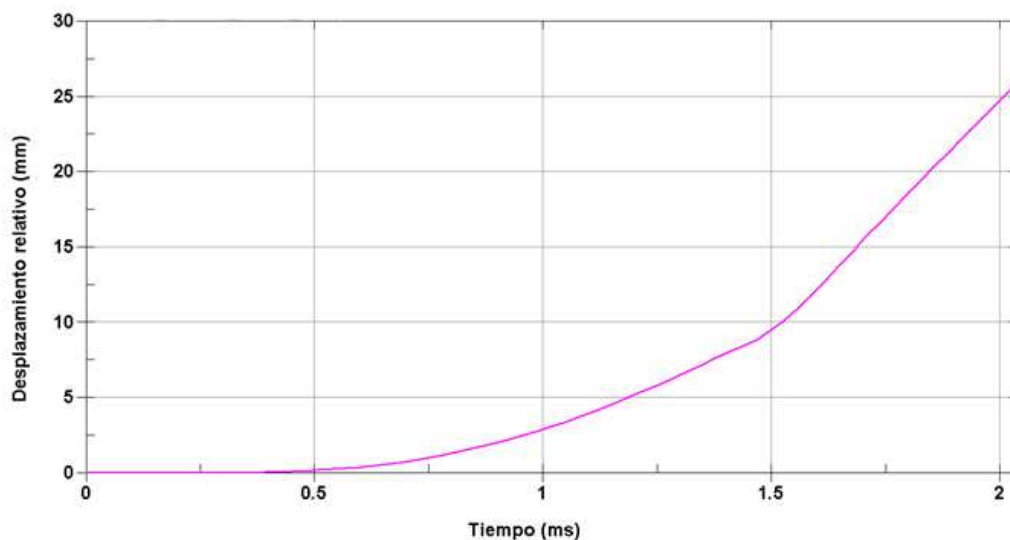


Figura 9 Histograma de desplazamiento

Estos productos del post-procesado también están pensados para su empleo conjunto. Cabe la comparación entre productos homólogos de casos diferentes pero semejantes o,

por otro lado, la combinación de distintos productos, de un mismo caso, que consigan una vista más global de los resultados.

Es importante volver a incidir en la importancia del post-procesado para validar un modelo ya que, al ser una herramienta de orientación industrial, y por ende privada, los resultados depurados que se muestren serán la cabeza visible de todo el trabajo previo. Un cliente potencial buscará el desarrollo de la simulación sin atender a las horas de diseño ni computación que conlleva. El empleo de la técnica explícita o implícita, el grado de paralelización u otros aspectos, quedan en un segundo plano tras la imagen del cuerpo impactando y deformándose o un histograma con el pico de tensión alcanzado.

3.2 INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA: FSI

FSI (*Fluid-Structure Interaction*) son las siglas en inglés de *Interacción Fluido-Estructura*, un tipo de cálculo particular que permite la simulación de flujo de material y además transmitir esfuerzos entre estructura y fluido.

Es importante hacer un inciso en la nomenclatura de este tipo de cálculos para poder entender cómo trabajan. Como *fluido* se entiende aquél entorno físico, sólido o líquido o gaseoso, del que se espera un elevado gradiente de desplazamientos en su materia; conlleva una formulación adecuada y sus desplazamientos son de un orden comparable a sus dimensiones. Como *estructura* se entiende un entorno físico anclado a la malla que lo define; el material que lo compone sufrirá las deformaciones que le determinen los desplazamientos nodales y su formulación impide flujo de material entre elementos adyacentes. Por último, *acoplamiento* es el proceso que permite el cálculo de esfuerzos debidos a la interacción de los entornos fluido-estructura.

Dicho lo cual no siempre entornos fluidos definirán líquidos reales; es posible que un caso vaya a recoger un evento real que provoque grandes deformaciones en un cuerpo sólido, como un conformado, donde, una malla estructural, puede no ser capaz de admitir variaciones en sus dimensiones del orden que el caso requiere.

Se ha dicho que la particularidad de este tipo de cálculo reside en la formulación que se aplica al entorno fluido. Debido a este aspecto se puede definir diferentes métodos para definir un entorno fluido:

- ALE: Siglas de *Arbitrary Lagrangian Eulerian*, Figura 10. Básicamente consiste en una malla de material que fluye dentro de otra malla que se traslada en el espacio. Una visión simplista de un entorno ALE puede ser el viaje de una lata con líquido en su interior.

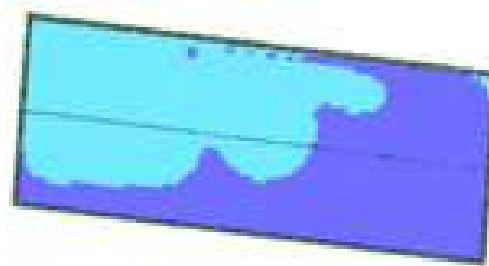


Figura 10 Flujo ALE dentro de un contenedor en caída libre

- **SPH:** Siglas de *Smooth Particle Hydrodynamics*, Figura 11. Este tipo de formulación se considera *mesh-free* ya que no requiere de una malla reticulada que defina su entorno. Se trata de partículas de material, con un área envolvente de actuación que transmite esfuerzos por la colisión entre las partículas. Es un comportamiento similar al de una piscina de bolas, pero presentando una cohesión entre esferas.

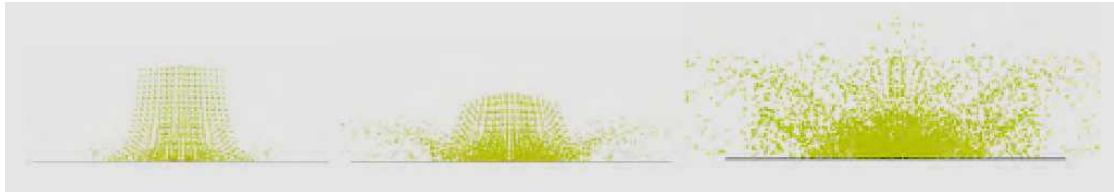


Figura 11 SPH impactando contra una superficie rígida.

SPH y ALE serán los dos métodos que se someterán a comparación en este proyecto. A continuación se procurará mostrar las capacidades de cada uno y la idoneidad para la última parte del proyecto.

3.2.1 MULTI-MATERIAL ARBITRARY LAGRANGIAN EULERIAN (ALE-MMALE)

El ALE es un método de simulado de fluidos basado en los desarrollos de una malla, esto es, depende de una malla reticulada para definir su entorno de actuación. Las siglas MMALE hacen referencia a la interacción de varios fluidos dentro de la misma malla.

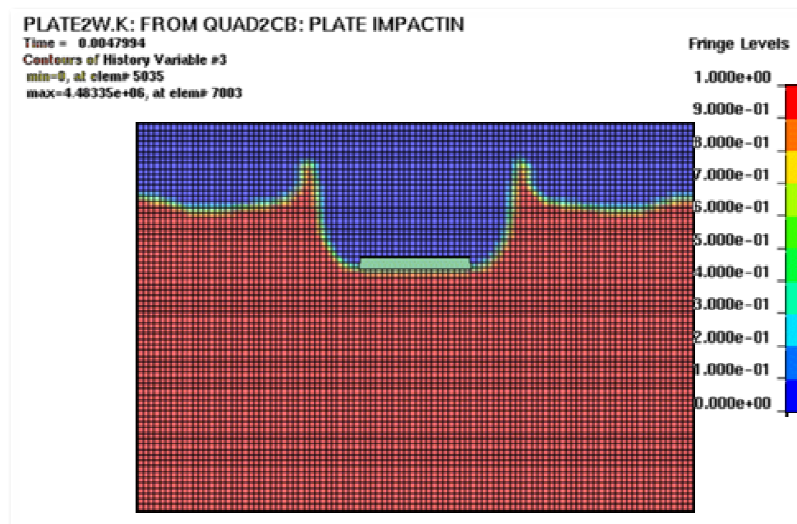


Figura 12 Cuerpo sólido acoplado con dos materiales ALE

Fue presentado en 1974 mediante el artículo, *An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds*, de la revista *Journal of Computational Physics*, por C.W Hirt, A.A Amsden, J.L Cook. En dicho artículo, esta nueva técnica numérica se expone como la solución a problemas multidimensionales de dinámica de fluidos.

Como se dijo, hay una coexistencia de dos mallas, una que define el entorno Euleriano-ALE y otra que está ligada al material y dibuja el flujo de éste. Para conseguir el flujo de material hay que cumplir dos pasos, Figura 13:

- Primero, el material, a través de la malla de material, sufriría deformaciones según un comportamiento lagrangiano, tal y como lo haría un elemento estructural.
- Segundo, una vez deformado de forma lagrangiana, el material se distribuye entre los elementos de la malla del entorno, lo que se conoce como *advección* de material, la cual tiene movimiento propio a lo largo del espacio y prepara el ALE para el siguiente estadio del cálculo.

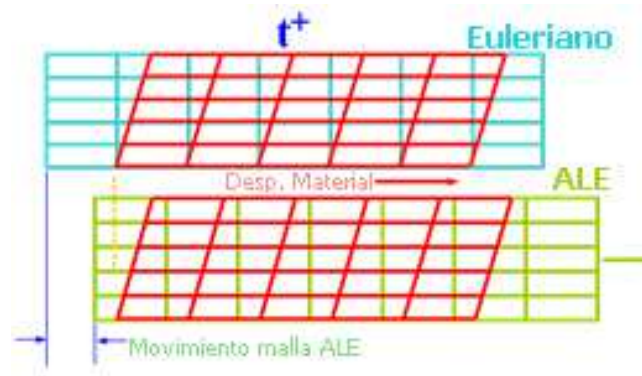


Figura 13 Esquema de ALE

La movilidad de la malla del entorno permite que no sea necesario definir grandes regiones para que el material fluya. LS-DYNA® posee distintas posibilidades para definir un movimiento previsto para el ALE, también medios de seguimiento para garantizar que el material queda englobado dentro de la malla si fuese necesario. Si no fuese necesario desplazar la malla del entorno, sería un tipo concreto de ALE, entonces se trataría de una formulación euleriana básica, con la malla del entorno fija en el espacio y el material fluyendo dentro de ella.

Diseño del mallado: En un primer momento, durante el pre-procesado, se diseña la malla que originariamente contiene el material-fluido; no se trata de diseñar el contenedor estructural que lo albergará durante el cálculo, si no de la región donde fluirá el material. Este entorno delimitará el terreno de actuación de los materiales ALE presentes en el cálculo; si se trata de volumen de agua con probables variaciones en su superficie, por ejemplo, la malla ALE será el espacio que ocupe un fluido inicialmente más la región que potencialmente alcanzará, rellena de otro material. Hay varias formas, pero una manera sencilla de situar cada uno de los materiales sería definiendo dos mallas, cada una con el volumen que ocupe cada material, coincidentes en nodos y convenientemente unidas mediante la fusión de sus nodos; esto es importante ya que el material está supeditado a la malla que lo aloja, de tal modo que ‘mergeando’ (fusionando) sus nodos definimos dos malla de material pero una única malla del entorno.

La fusión de mallas ALE es una práctica indispensable para conseguir un desarrollo adecuado del caso fluidodinámico. La interacción entre fluidos es sencilla gracias a esta tecnología y las superficies tensionales de los materiales fluidos son fácilmente dibujadas gracias a los algoritmos del ALE, pero, si no se respeta una continuidad en el entorno ALE para los diversos materiales, estos no podrán encontrarse e interactuar según la dinámica del problema. Una vez ‘relleno’ el elemento del entorno con los distintos materiales ALE

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

que pueden fluir en él, las tensiones de los grupos materiales serán funciones de la fracción volumétrica que ocupe cada material en el elemento.

Acoplado fluido estructura: La idea del mecanismo de acoplado entre lagrangiano y euleriano es relativamente sencilla en la teoría, Figura 14.

1. El solver busca intersecciones entre entidades lagrangianas y eulerianas.
2. Si da con una, al comienzo del paso de tiempo, toma nota de los nodos coincidentes entre elementos de distinta formulación y los deja transitar.
3. Se registra el trayecto independiente entre ellos durante el desarrollo del paso de tiempo, dt , y calcula la distancia de penetración.
4. Por último, con la distancia de penetración, calcula la fuerza de acoplamiento y la distribuye en ambas mallas.

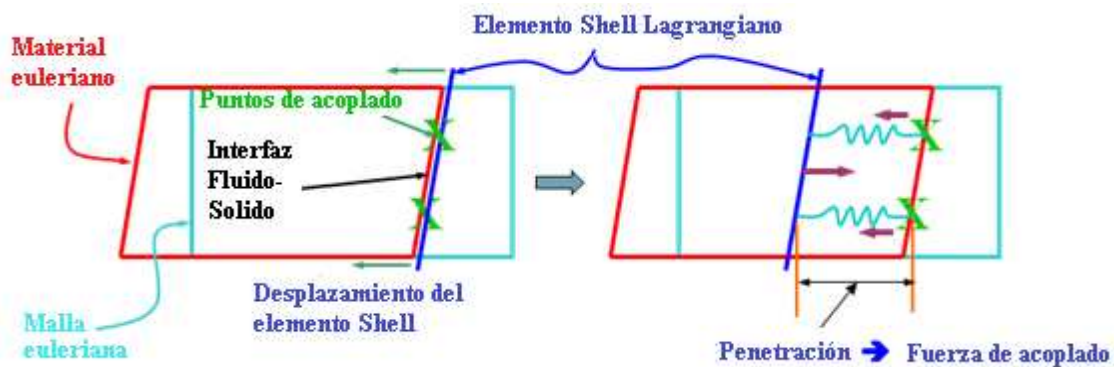


Figura 14 Esquema de acoplado

Básicamente se define un resorte entre las caras de los elementos que acoplan y, considerando una rigidez teórica (según densidad, cohesión, presión ambiental y rigidez lagrangiana), se obtiene la fuerza del muelle en función de su desplazamiento. Para conseguir la intersección entre entidades (y también para facilitar el diseño de la malla ale), debe existir solapamiento entre malla ALE y malla lagrangiana, obviando inclusiones de malla, las cuales no tienen relevancia en el cálculo ALE.

3.2.2 SMOOTH PARTICLE HYDRODYNAMICS (SPH)

La tecnología de partículas hidrodinámicas suavizadas, o SPH por sus siglas en inglés, es un sistema de integración de múltiples cuerpos desarrollado por Lucy, Gingold y Monaghan en 1977.

En un primer momento se ideó para simular interacciones entre macroestructuras cósmicas, con tal capacidad que ha sido empleado para simular comportamientos de galaxias como la evolución del propio universo. Su ámbito de aplicación no ha quedado ahí, debido a su intrínseca capacidad para desarrollar complicados efectos físicos, fue desarrollado para superar los problemas de inestabilidad de malla debido a altas deformaciones, Figura 15.

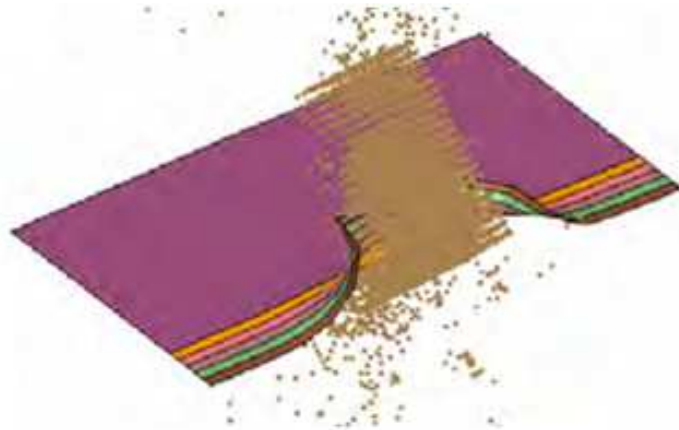


Figura 15 Ejemplo de aplicación del SPH

El método de simulación de fluidos mediante SPH tiene la particularidad, como ya se comentó, de que no necesita de una malla para definir su entorno. El entorno inicial del SPH lo forman un conjunto de partículas, en mayor o menor medida, y la 'zona de influencia', de radio determinado h_0 , que las envuelve. Luego este entorno se irá desarrollando a medida que las partículas se muevan por efecto de las solicitaciones aplicadas.

Pese a que se ha comentado que el comportamiento es semejante al de una piscina de bolas, existe un grado de compresibilidad por defecto. Si el desarrollo del caso lleva a dar lugar a una determinada concentración de partículas, el radio de envoltura, o *longitud de suavizado*, aumentará o disminuirá dentro de un rango de valores.

Su interacción con el entorno se basa en los métodos de contacto habituales, los mismos que emplea las mallas lagrangianas para interactuar. Son contactos por '*penalty*' en lugar de por restricción. Se indican regiones de elementos, sujetas a un esperable solapamiento, y el programa buscará penetraciones de nodos '*slave*' a través de segmentos '*master*'. La búsqueda se realiza mediante distintos algoritmos, en función de la naturaleza del contacto implementado, para cada tiempo de paso. Cuando se detecta una penetración, se aplica a la región una fuerza proporcional a la penetración; esta se opone a la penetración resistiendo su avance y, posteriormente, eliminando la penetración. El método '*penalty-based*' para contactos, es semejante al acoplado fluido-estructura y trataría las penetraciones de partículas SPH en el entorno lagrangiano.

Por otro lado, pese a su sencillez en la aplicación, su mayor defecto es la necesidad de un alto número de partículas para conseguir resultados óptimos, esto conlleva un alto grado de computación que, actualmente, frena su aplicación en mayor medida frente a otras tecnologías 'FEM' o impone su utilización combinado con otros elementos menos pesados computacionalmente como los elementos lagrangianos.

3.3 CRONOLOGÍA

- Primer tercio de 1974: C.W. Hirt, A.A. Amsden y J.L. Cook presentan '*An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds*', donde exponen el ALE como nuevo método de cálculo de fenómenos fluidodinámicos.

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

- Segundo tercio de 1974: W.E. Pracht muestra la capacidad del método ALE para calcular casos tridimensionales aplicando las ecuaciones de Navier-Stokes; también remarca la utilidad del método para mostrar el camino de una partícula fluida entre otros aspectos.
- En el primer tercio de 1975 C. Chan expone '*A generalized Arbitrary Lagrangian Eulerian method for incompressible flows with Sharp interfaces*', donde se incluye por primera vez un método de amortiguación (*damping*) para mejorar la estabilidad del cálculo.
- En 1977, Lucy, Gingold y Monaghan desarrollaron el método *Smoothed Particles Hydrodynamics*, que supuso un método revolucionario sin malla, para simular fenómenos astrofísicos de manera simple.
- En 1988 ocurren varios hitos coetáneos; por una parte, Lin, Chang, Chen y Belytschko profundizan en la formulación del método ALE para mejorar la matriz de rigidez entre otros aspectos. Por la otra, Benz (y posteriormente Monaghan y otros) consigue simular colisiones estelares con la tecnología SPH.
- En 1989 Ramaswamy, consigue mejorar las ecuaciones primitivas gracias al cálculo explícito, en concreto aplicando correcciones en la velocidad del fluido.
- Durante la década de los 90 se sucedieron los casos en los que, tanto la tecnología ALE como la tecnología SPH, demostraron su utilidad: flujos turbulentos mediante ALE (Ushijima, 1995), agujeros negros mediante SPH (Lee, 1998), etc.
- En los primeros años del 2000 (2003 y 2005) Liu y Liu y Monaghan se centran en la aplicación del SPH para casos fluidodinámicos, generando varios casos. Estudios paralelos intentan resolver carencias en incompresibilidad (ISPH, varios autores) y la discontinuidad (DSPH, Liu y Liu 2003), propios del método original.

Lo anterior resume el estado del arte previo a los casos seleccionados para este artículo. Ambas tecnologías aparecieron en los años setenta, en los noventa potenciaron su capacidad de simulación y, mientras que el ALE apenas desarrollo grandes modificaciones en su funcionamiento, el SPH ha ido recibiendo modificaciones que ampliaban su campo de acción original.

A continuación se expondrán los casos sobre los que se trabaja en este proyecto. Por un lado el estudio de Yettou, Desrochers y Champoux: *Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge* [16]; caso eminentemente experimental que estudia la interacción de un bisel al impactar contra agua líquida. Por otro lado, el trabajo de N. Pentecôte junto a D. Kohlgrüber: *Crash on water: a multy-physics problem* [13]; donde se simula con SPH un amerizaje de una maqueta en un canal de agua.

CASO 1: EXPERIMENTAL STUDY ON THE WATER IMPACT OF A SYMMETRICAL WEDGE

Aut: El-Mahdi Yettou, Alain Desrochers e Yvan Champoux

Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sherbrooke, Québec. Canadá. 29 de Septiembre de 2005.

El estudio recoge los resultados de la investigación de la caída libre de un canto sólido en el agua, en concreto la distribución de presiones en los primeros estadios del impacto. Estudian la variación con respecto a la altura de caída, el ángulo del canto y la masa del cuerpo.

Su objeto de estudio es dar base experimental a nuevos modelos de cálculo de presiones en cascos de navíos. Sobrepresiones repetitivas sobre las superficies de los cascos producen a largo plazo daños en la estructura. Conocer la presión a la que se someterá la estructura mejorará los diseños y reducirá costes de mantenimiento, pero es difícil de cuantificar. Yettou y sus colegas reflejaron la relación existente entre la variación de velocidad durante la entrada al fluido y la presión máxima resultante, de tal forma que, a través del gradiente de velocidad, se puede averiguar aproximadamente la presión máxima en la superficie.



Figura 16 Ejemplos de cascos de navíos

Para llevar a cabo el experimento, prepararon una cubeta con agua (dimensiones: 2m de anchura, 30m de longitud y 2m de profundidad), un rail para guiar verticalmente el cuerpo y un grupo de cuñas con ángulos y masas variables, aparte de los instrumentos de medición, que consisten en un transductor de desplazamiento y 12 transductores de presión, dispuestos a lo largo de la cara oblicua.

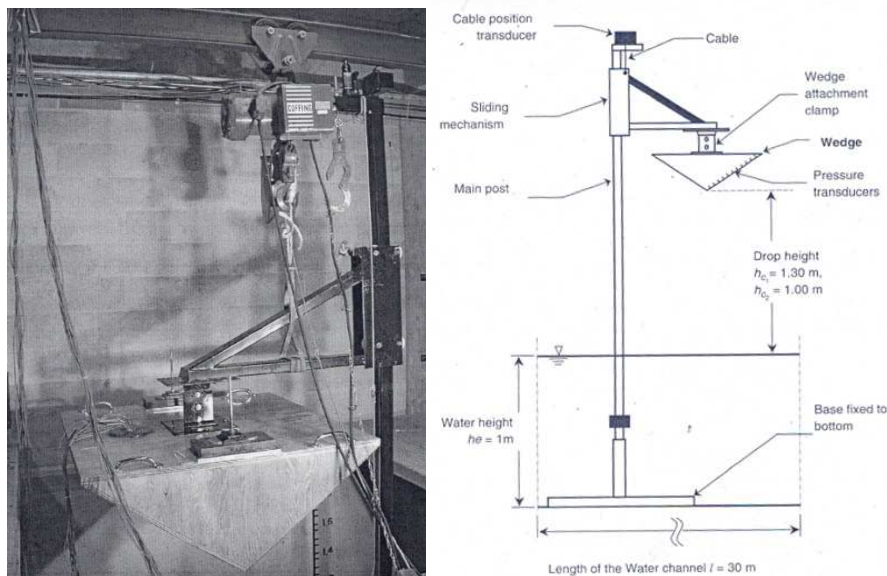


Figura 17 Experimento del artículo [16] y croquis del mismo

Como se ha indicado previamente, el estudio atenderá a distintas variables de cara al comportamiento de inmersión. La cuña posee una cara cuadrada de 1.2m de lado y el

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

ángulo de ataque está comprendido entre los 15 y los 35 grados, lo que hace que las masas varíen desde los 89 kg hasta los 104. También se estudia la altura de caída, dos casos, 1 y 1.30 metros.

En este proyecto se buscará la comparación con el caso de 94 kilogramos, 25 grados y 1.3 metros ya que son los resultados reflejados en el artículo [16]. Se estudiará la presión en 12 puntos, correspondientes a los 12 transductores de presión, así como la curva de desplazamiento y la curva de penetración en el agua.

CASO 2: CRASH ON WATER: A MULTY-PHYSICS PROBLEM

Aut: Nathalie Pentecôte, Dieter Kohlgrüber

DLR Instituto de Estructuras y Diseño, Pfaffenwaldring 38-40, Stuttgart, Alemania, 2008

Este estudio expone la capacidad del sistema SPH en la simulación de casos de *ditching*, y lo hace en dos partes, una de ellas recoge la simulación de un amerizaje vertical de un helicóptero WG 30 con estructura de aluminio, de forma semejante al ensayo patrón del capítulo II; la otra parte simula el amerizaje tangencial de una maqueta a escala de un avión tipo *high-wing*, Figura 18, en un canal de agua para comparar con datos reales. Este segundo caso es el que será considerado para comparar las capacidades del SPH de LS-DYNA® para fuerzas viscosas.

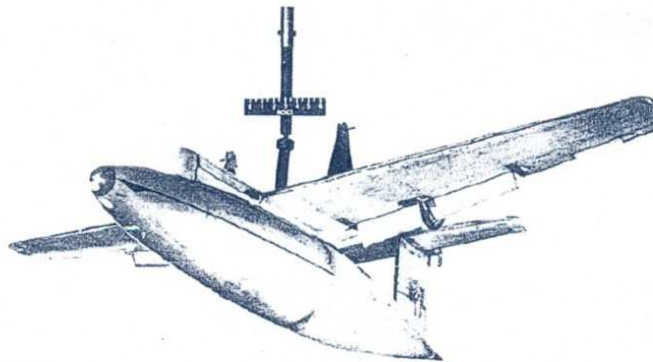


Figura 18 Maqueta tipo High Wing

El experimento se realizó con una maqueta que atendía a una serie de disposiciones como eran la forma ojival del fuselaje y la disposición superior de las alas y los flaps de la cola, esto último para evitar su influencia en el amerizaje; el avión tenía una longitud de 1.219 mm, un radio máximo de 102 mm, envergadura de 1676 mm y un peso de 5.67 kilogramos. La maqueta fue propulsada por un monorraíl que le permitía adoptar una posición de 10 grados con respecto a la horizontal y una velocidad de 9.14 metros/segundo. Mediante cámaras de alta velocidad se pudo tomar histogramas de parámetros tales como la velocidad y el cabeceo del avión. El período de estudio fue de un segundo.

4 MODELIZACIÓN NUMÉRICA

4.1 CASO DE INTERACCIÓN CUÑA Y AGUA, EMPLEANDO ALE Y COMBINACIÓN SPH-LAGRANGIANO

Como cualquier ensayo científico, los modelos de cálculo por elementos finitos necesitan ser comprobados. Pese a la semejanza de la malla o del grado de exactitud de las ecuaciones de cálculo del programa, la combinación de los errores, inherentes a una aproximación como ésta, hacen que sea necesario comparar casos sencillos con experimentos reales.

Son muchas las variables que se pueden llegar a desconocer en un cálculo concreto o que, por la complejidad de su medida, deber ser resumidas a un valor estándar para poder avanzar. También muchas ecuaciones empleadas son producto de desarrollos estadísticos de una serie de experimentos. Por ello, es necesario enfrentar los modelos (de material, deformación, etc.) empleados con ensayos reales a fin de verificar un comportamiento adecuado. En el presente proyecto, se verificará el grado de precisión de los métodos ALE y SPH con un modelo sencillo de impacto contra el agua.

4.1.1 MODELO EN ELEMENTOS FINITOS

El modelo de elementos finitos será preparado para un cálculo explícito, que es el desarrollado para FSI, tanto en ALE como SPH. Las unidades a emplear son las definidas para sucesos a velocidad media impactos, esto es, milímetros, segundos y toneladas y sus derivadas.

Tabla 1 UNIDADES

Distancia (e)	Milímetros	mm
Tiempo (t)	Segundos	s
Masa (m)	Toneladas	Tn
Velocidad (e/t)	Milímetros/segundo	mm/s
Aceleración (e/t ²)	Milímetros/segundo cuadrado	mm/s²
Fuerza (me/t ²)	Newtons (N)	Tnmm/s²
Presión-Tensión (m/t ² e)	Mega Pascales (MPa)	Tn/s²mm

Se busca simplificar el modelo de manera racional. El ahorro de computación debe ser correspondido con una aproximación aceptable de los resultados. Es conveniente ahorrarle a la malla elementos que no serán trascendentes para el resultado buscado y también no alargar el tiempo de cálculo más de lo necesario; por otro lado también será conveniente conseguir un cálculo estable, LS-DYNA® posee herramientas para evitar valores incoherentes que den por finalizado el cálculo, esto es útil, pero evitable si la geometría no

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

requiere una malla muy compleja. Dicho lo cual se pueden exponer las siguientes simplificaciones al modelo real:

- Configuración: Debido a la posición de la cuña dentro de la cubeta la configuración del modelo será en tres dimensiones. La necesidad de implementar tarjetas concretas para 2D, junto con la falta de continuidad de la cuña en todo el ancho de la cubeta y la pérdida de fiabilidad en los resultados, llevaron a descartar el diseño en dos dimensiones para lograr el propósito buscado.
- Simetrías: Gracias a la geometría del ensayo se emplearán simetrías, Figura 19, que reducirán la geometría a un cuarto del original, el guiado de la cuña mediante un raíl garantiza que no hay deriva del filo, esto garantiza desplazamientos laterales nulos. Para simular estas condiciones se implementarán condiciones de contorno concretas en los planos simétricos.

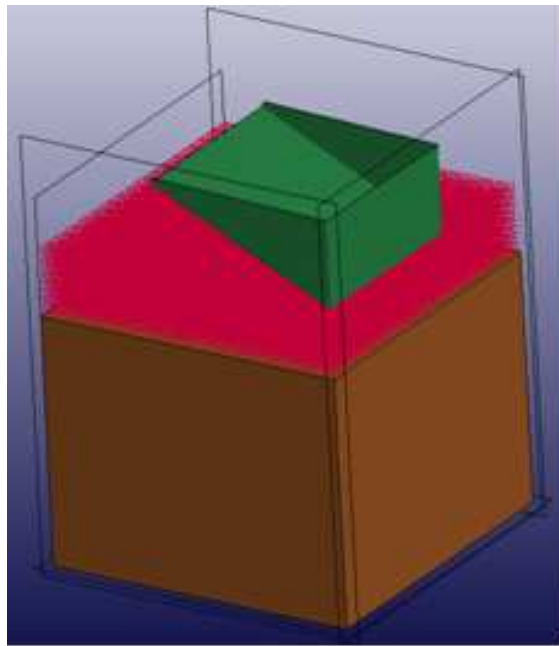


Figura 19 Geometría del modelo, simplificada un cuarto, para el caso combinado

- Tipo de elemento: No se mallará una cuña sólida, en su lugar se mallará sus caras empleando *shells*, de rigidez infinita, que aligeran las operaciones de cálculo, Figura 20. La medición de la presión sólo se realiza en los transductores de presión, por lo que no es relevante qué presión o deformación sufre el resto del sólido.

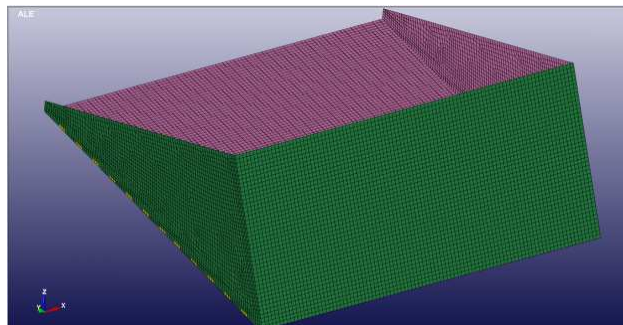


Figura 20 Cuña diseñada en shells

- Suavizado de bordes, Figura 21: Debido a la naturaleza de los métodos de contacto y acoplado, es conveniente evitar interacciones entre bordes (filas de nodos) de elementos, lo que puede provocar inestabilidades. Por ello, se mallará la cuña con un chaflán a fin de garantizar contacto nodo-segmento, con una longitud característica despreciable con respecto a las dimensiones de la cuña.

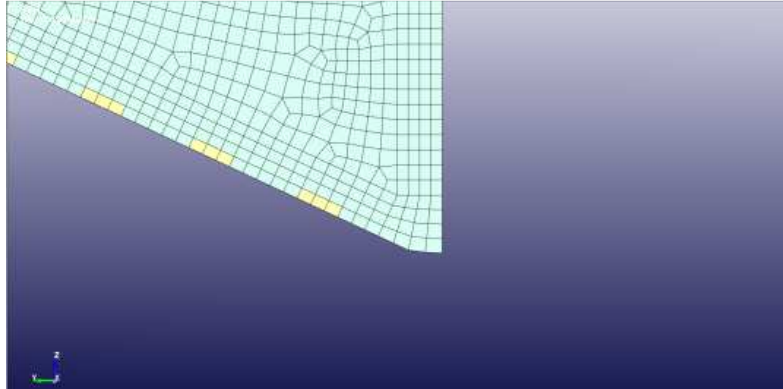


Figura 21 Detalle del suavizado de la arista de la cuña

- Tiempo de cálculo: Atendiendo a los datos experimentales recogidos en el artículo 'Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge' el 90% de la energía cinética que posee la cuña se pierde en los primeros 50 ms tras el impacto, el período de interés; por lo cual, el tiempo de cálculo será tal que recoja el período de interés y un tiempo previo. Este tiempo previo se empleará en empujar la cuña desde una posición cercana a la superficie del agua con velocidad inicial y que impacte, de manera natural, contra esta; si se colocara directamente sobre la superficie, cabe la posibilidad de que hubiese acoplado tardío y el ALE se filtrara a través del Lagrangiano. Por tanto se establece un tiempo de 100 ms para desarrollar el cálculo y, de éste modo, garantizar que se abarca el período crítico de deceleración.

A continuación se detallan los modelos numéricos desarrollados, para los diferentes métodos numéricos empleados, con objeto de reproducir el proceso de caída de una cuña en una cubeta con agua, estudiado experimentalmente en [83], previamente mencionado:

1. ALE

- 1.1. Modelo con arista en elemento ALE de 10 mm (caso '30.03.11.k')
- 1.2. Modelo con arista en elemento ALE de 12 mm (caso '24.03.11.k')
- 1.3. Modelo con arista en elemento ALE de 18 mm (caso '29.03.11.k')

2. Combinación SPH-Lagrangiano

- 2.1. Modelo con separación entre SPH de 10 mm (caso 'lan-sph_10mm.k')
- 2.2. Modelo con separación entre SPH de 12 mm (caso 'lan-sph_12mm.k')
- 2.3. Modelo con separación entre SPH de 18 mm (caso 'lan-sph_18mm.k')

4.1.1.1 ALE

El modelo está compuesto por 4 partes que se enuncian a continuación:

1. Agua, Figura 22 (*pid*=1): Se trata de una *part* en bloque, formada por elementos ALE hexaédricos, esto garantiza la propagación óptima de material dentro de la malla. Se le aplica la tarjeta **MAT_NULL*, diseñada para modelar fluidos en LS-DYNA®, y su ecuación de estado correspondiente, **EOS_GRUNEISEN*, que define la presión en el fluido en función de la velocidad de deformación.

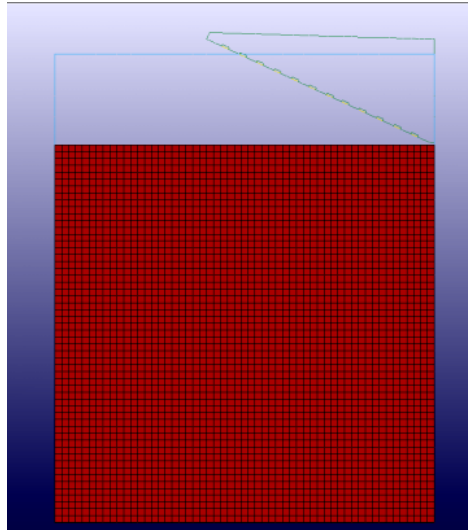


Figura 22 Part Agua

2. Aire, Figura 23 (*pid*=2): Tiene la misma configuración que el agua, con elementos ALE hexaédricos y se encuentra unida con ella en la cara coincidente, promoviendo la continuidad de malla. Se le asocia el modelo de material NULL con las propiedades del aire a temperatura ambiente. Como su comportamiento en este caso no es relevante, se le define su estado energético inicial con la tarjeta **EOS_LINEAR_POLYNOMIAL* que, para condiciones estándar, define la presión e un gas ideal.

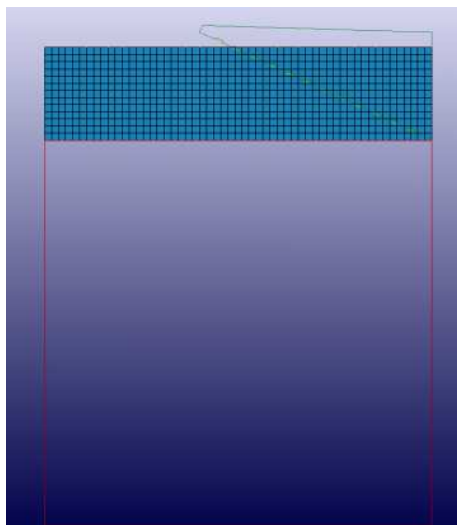


Figura 23 Part aire

3. Cuña, Figura 24 (*pid* =3): Se trata de un *PART_INERTIA con material rígido y elementos *shell*. El uso de un *PART_INERTIA se debe a que, gracias a esta tarjeta, es posible aplicar masas y momentos de inercia concretos, que no los correspondientes a la geometría dibujada. El empleo de *shells* aligera la computación; al no estudiar la deformación podemos emplear este tipo de elemento que acarrea menos nodos en los algoritmos. *MAT_RIGID simula el comportamiento indeformable de la cuña al impactar, manteniendo la disposición de los nodos rígidos.

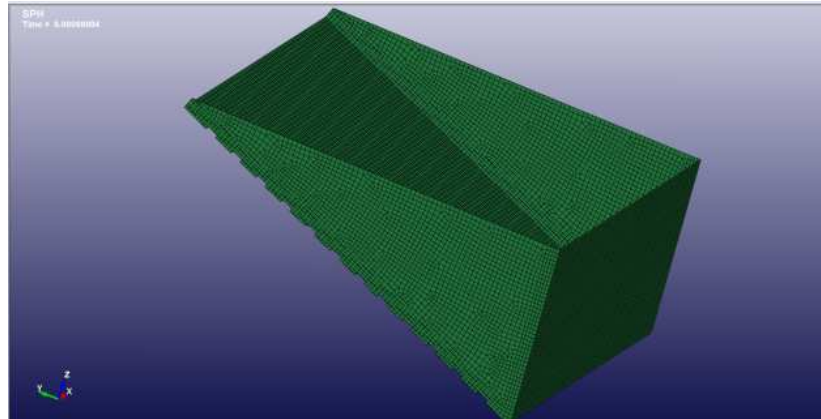


Figura 24 Cuña

4. Zona de transductores, Figura 25 (*pid*=4): Debido al comportamiento de *MAT_RIGID, no es posible obtener esfuerzos en los nodos rígidos, sólo desplazamientos, velocidades o aceleraciones. De tal modo, se define una serie de *shells* con material deformable (*MAT_ELASTIC) que evite este inconveniente, estando solícito a los esfuerzos que se le aplicarán.

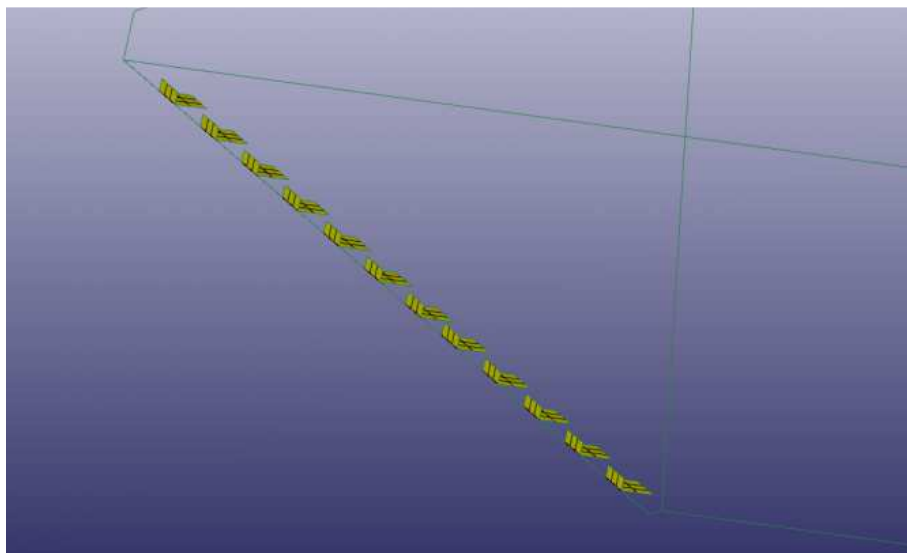


Figura 25 Transductores

Uno de los aspectos más significativos del modelo es la ausencia de las paredes de la cubeta, estas han sido sustituidas por soluciones propias del software de cálculo que evitan tener que incluirlas en el modelo. Más adelante se expone este detalle.

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA**AGUA, PART 1****- TIPO DE ELEMENTO (*SECTION)**

La siguiente tarjeta define el tratamiento que se aplicará a los elementos que conforman la malla.

```

*Section_solid_ALE
*SECTION_SOLID_ALE
$#   secid   elform   aet
      1       11       3
$#   afac    bfac    cfac    dfac    start    end    aafac
      0.000    0.000    0.000    0.000    0.000    0.000    0.000

```

Figura 26 Tarjeta de sección ALE

Es la sección común para los elementos de la *PART Agua y de la *PART Aire. Se trata de una tarjeta sencilla para la que sólo hay que definir dos parámetros, Figura 26.

- *Elform*: Con este parámetro se define el tipo de formulación que se aplicará al elemento. El tipo 11 es uno de los tipos ALE existentes, por ello, seguirá la formulación ALE previamente descrita; este tipo concreto está indicado para tratar la coexistencia de varios materiales ALE en una misma malla y la interacción entre ellos
- *AET*: Define la relación del elemento con su ambiente. Se define el valor 3 que supone que el elemento, de ser necesario, se expandirá, por la diferencia de presión, al ambiente circundante.

Hay otro tipo de formulación ALE, el tipo 12, que trata con un único material ALE, de densidad elevada, y un hipotético vacío provocado por un entorno más ligero. En un primero momento se planteó de cara al caso, pero al no tratarse de un fluido confinado en un tanque o tubería y estar expuesto a la atmósfera esta formulación no aportaba un comportamiento correcto por lo que fue descartado.

- MATERIALES (TARJETAS *MAT)

El programa LS-DYNA® posee la capacidad de definir más de 200 tipos de ecuaciones constitutivas de material, divididos según propiedades macroscópicas, tipo de elemento o aplicación.

- *MAT_NULL, Figura 27: Se emplea este material ya que permite el empleo de ecuaciones de estado y no considera esfuerzos cortantes. Es el material habitual para diseñar fluidos en ALE. Propiedades obtenidas de [1].

```

*MAT_NULL
Agua
$#   mid      ro      pc      mu      terod      cerod      ym      pr
      1 1.0000E-9-1.000E-20 1.0030E-9    0.000    0.000    0.000 0.300000

```

Figura 27 Tarjeta de material 'NULL'

- Agua (mid 1):

- Densidad, ro : $1,0e-9 \frac{Tn}{mm^3}$
- Viscosidad, mu : $1,003e-9 \frac{Tn}{mm \cdot s}$

- ECUACIONES DE ESTADO (*EOS)

Algunos materiales presentes en el software necesitan que se definan su entorno y/o condiciones termodinámicas iniciales. Según el material, la naturaleza del caso y los datos a definir, se precisa un tipo concreto de ecuación de contorno. En el caso MMALE sólo los materiales 'NULL' requieren de ecuaciones de estado.

Agua: *EOS_GRUNEISEN, Figura 28. Define la presión en materiales sometidos a tensiones debido al shock causado por la energía cinética del material. Existen muchas tablas que recogen los parámetros concretos para esta tarjeta según el material empleado. En este caso se recopilieron de [1].

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \mu) E$$

Ecuación 2

Donde E es la energía interna por unidad de volumen, C es el punto de intersección en la curva u_s-u_p , S_1 , S_2 , y S_3 son coeficientes de la pendiente de la curva u_s-u_p , γ_0 es el parámetro de Gruneisen y a es el primer corrector de γ_0 .

```
*EOS_GRUNEISEN_TITLE
EOS_agua
$#   eosid      c      s1      s2      s3      gamma0      a      e0
      1 1.4830E+6 1.750000 0.000 0.000 0.280000 3.000000 0.001240
$#      v0
      1.000000
```

Figura 28 Tarjeta de ecuación de estado Gruneisen

AIRE, PART 2

- TIPO DE ELEMENTO (*SECTION)

Como se ha comentado previamente la parte 'Agua' y la parte 'Aire' comparten el mismo tipo de elemento, SOLID_ALE, que está definido en la Figura 26.

- MATERIALES (TARJETAS *MAT)

Emplea el mismo tipo de material que la parte 'Agua' pero con las propiedades adecuadas al aire atmosférico. Obtenido de [1].

```
*MAT_NULL_TITLE
Aire
$#   mid      ro      pc      mu      terod      cerod      ym      pr
      21.2200E-12 1.000E-20 1.7700E-11 0.000 0.000 0.000 0.300000
```

Figura 29 Tarjeta de material 'NULL' para el aire

o Aire (mid 2):

- Densidad, ro : $1,22e-12 \frac{Tn}{mm^3}$
- Viscosidad, mu : $1,77e-11 \frac{Tn}{mm \cdot s}$

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA**- ECUACIONES DE ESTADO (*EOS)**

Aire: *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL. Define el estado termodinámico inicial a partir de una relación polinomial. Se definen los coeficientes apropiados junto al volumen inicial y la energía interna inicial. No se empleó la tarjeta propia a la hipótesis de gas ideal (*EOS_IDEAL_GAS) porque ha caído en desuso, actualmente con definir los parámetros C4 y C5 ($C_4=C_5=\gamma-1$) y la energía inicial queda el estado definido. Obtenido de[1].

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E$$

Ecuación 3

```
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL
$#   eosid      c0      c1      c2      c3      c4      c5      c6
      2      0.000      0.000      0.000      0.000      0.400000      0.400000      0.000
$#   e0      v0
      0.001510      1.000000
```

Figura 30 Tarjeta de ecuación de estado Polynomial

- Coeficientes C4,C5: $C_4 = C_5 = \gamma - 1 = \frac{C_p}{C_v} = 0,4$
- Energía inicial, e0: $e_v = [\rho_0 C_v T] \frac{\rho}{\rho_0} = 1,24e - 3 \frac{N}{mm^2}$

CUÑA, PART 1**- TIPO DE ELEMENTO (*SECTION)*****Section_shell**

Los elementos tipo *shell* son una ayuda notable al cálculo por elementos finitos. Se definen por 4 nodos y los segmentos que los unen y pueden simular el comportamiento de cuerpos con un espesor muy pequeño comparado con sus superficies. Son adecuadas para modelizar cuerpos de relativa elasticidad con un espesor muy pequeño como telas o chapas. Al no poseer espesor físico, es necesario definir un espesor en sus cuatro nodos (t_1 , t_2 , t_3 y t_4) y, si se busca una integración del elemento severa, un número de elementos en espesor (*nip*) hipotéticos.

La cuña y la zona de los transductores tienen secciones por separado, debido al comportamiento divergente de ambas, aunque sin tener que definir una formulación de elemento (*elform=2*) severa.

- Cuña: Se le definió la sección 3 (*secid=3*), que emplea la formulación 2, Belytschko-Tsay, por defecto y un espesor de 1mm debido a la rigidez intrínseca de los elementos.

```
*SECTION_SHELL
$#   secid   elform   shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
      3       2      0.833300      3       1       0       0       1
$#   t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000      0.000      0.000      0.000      0
```

Figura 31 Tarjeta de sección shell, espesor 1mm

- MATERIALES (TARJETAS *MAT)

***MAT_RIGID (MID 3):** Mantiene la disposición geométrica constante para los nodos asociados a él, además permite definir intrínsecamente las restricciones al movimiento (parámetros *cmo*, *con1* y *con2*). Ideal para definir bastidores indeformables, las propiedades físicas que adopta son necesarias para calcular los contactos y acoplados que pueda sufrir, en este caso, se aplican las propiedades de madera de balsa (*plywood*), material definido en el ensayo patrón.

```

*MAT_RIGID
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
      34.6700E-10 2000.0000 0.300000      0.000      0.000      0.000
$#      cmo      con1      con2
      0.000      0      0
$# lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000

```

Figura 32 Tarjeta de material rígido ideal

- Densidad, ro : $4.67e-10 \frac{Tn}{mm^3}$
- Módulo de rigidez, e : $2.0e3$ Mpa
- Módulo de Poisson, pr : 0.3
- Restricciones, $cmo-con1-con2$: Sin restricción.

- ECUACIONES DE ESTADO (*EOS)

Este tipo de material no requiere de ecuación de estado.

ZONA DE TRANSDUCTORES, PART 4**- TIPO DE ELEMENTO (*SECTION)*****Section_shell**

Zona de los transductores: Se le asignó la sección 4 con la misma formulación y un espesor de 19mm que es el espesor del panel de madera que define el ensayo.

```

*SECTION_SHELL_TITLE
Box
$#      secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
      4      2      0.833333      3      3      0      0      1
$#      t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
      19.000000 19.000000 19.000000 19.000000      0.000      0.000      0.000      0

```

Figura 33 Tarjeta de sección shell para transductores, espesor 19mm

- MATERIALES (TARJETAS *MAT)

***MAT_ELASTIC:** Define el comportamiento de un material isotrópico e infinitamente elástico, práctico para cálculos para los que no se esperan grandes deformaciones plásticas. Se aplican propiedades de madera de balsa (*plywood*) obtenidas en [2], material definido en el ensayo patrón.

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

```
*MAT_ELASTIC
$#      mid      ro      e      pr      da      db      not used
      44.6700E-10 2000.0000 0.300000      0.000      0.000      0
```

Figura 34 Tarjeta de material elástico

- Densidad, ro : $4.67e-10 \frac{Tn}{mm^3}$
- Módulo de rigidez, e : $2.0e3$ Mpa
- Módulo de Poisson, pr : 0.3

- ECUACIONES DE ESTADO (*EOS)

Este tipo de material no requiere de ecuación de estado.

CONFINAMIENTO, LÍMITES DEL MODELO Y PAREDES

- CONDICIONES DE CONTORNO (*BOUNDARY)

Como se ha comentado en varios puntos del documento, muchas veces es necesario acotar el ámbito de estudio para ahorrar recursos y tiempo. Para hacerlo de manera efectiva, es necesario sustituir el entorno a eliminar por soluciones que devuelvan un comportamiento muy similar al que se espera, aligerando el cálculo.

La principal condición de contorno a resolver serán las simetrías de la geometría y las extensiones del modelo más allá de la zona de interés, esto es, paredes de la cubeta y canal de la cubeta.

Para las paredes, no es necesario modelar una pared con la que el fluido acople, esto supondría más computación y mayor tamaño de archivos, basta con agrupar los nodos de las caras de fluido que tocarían con las paredes y restringir su desplazamiento en la dirección normal a la hipotética pared. Por la tecnología que posee el software, no se puede tratar estas paredes como en un avanzado programa de CFD, como el CFX, lo que supondría que la velocidad de la capa límite en dichas paredes sería nula, esto obligaría a mallar elementos ALE con una arista ínfima, que simulara el efecto viscoso, para reducir al mínimo el material ALE que no pueda fluir. Afortunadamente, la tecnología ALE, a nivel macroscópico, trata adecuadamente el deslizamiento de un fluido sobre una superficie. Retomando la cuestión, la restricción se efectuará con los set de nodos (*SET_NODE) pertinentes y las tarjetas *BOUNDARY_SPC.

```
*BOUNDARY_SPC_SET
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
      1          0          0          1          0          1          0          1

*SET_NODE_LIST
$#      sid      da1      da2      da3      da4
      1      0.000      0.000      0.000      0.000

$#      nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
      366475      376880      376879      366474      404604      404603      440501      440500
```

Figura 35 Tarjetas para definir condiciones de contorno

Este método también se empleará para los planos de simetría en los que los esfuerzos normales quedarían anulados y sólo habría variaciones tangenciales. En la tarjeta arriba mostrada se emplea el set $sid=1$ (nsid), al que precede, y se restringen los siguientes grados de libertad: traslacional en Y, dofy, y rotacionales del plano XZ, dofrx y dofrz. Se

completa para los planos X y Z de manera análoga. LS-DYNA® posee una tarjeta específica que implementa un plano de simetría para la malla ALE, el problema es que, por limitaciones de software, sólo acepta un único plano de simetría por caso.

La tarjeta *BOUNDARY_SPC también se empleará en guiar la cuña como si estuviera anclada al raíl del ensayo. Al ser rígida, será suficiente con tomar 3 puntos del cuerpo rígido y restringir desplazamientos en X e Y. Esta manera es más eficaz que emplear las restricciones del material rigid, los parámetros *cmo*, *con1* y *con2*, que actúan en el centro de masas del cuerpo rígido y hacían pivotar la cuña, rebasando el plano de simetría.

Para la extensión de la geometría, esto es las regiones de atmósfera sobre el ensayo y el resto del canal de la cubeta, se implementa la tarjeta *BOUNDARY_NON_REFLECTING. Esta tarjeta evita el efecto espejo que conlleva el confinamiento de material dentro de la malla ALE, supondría que el frente de onda generado por la cuña rebotaría contra las paredes exteriores de la malla.

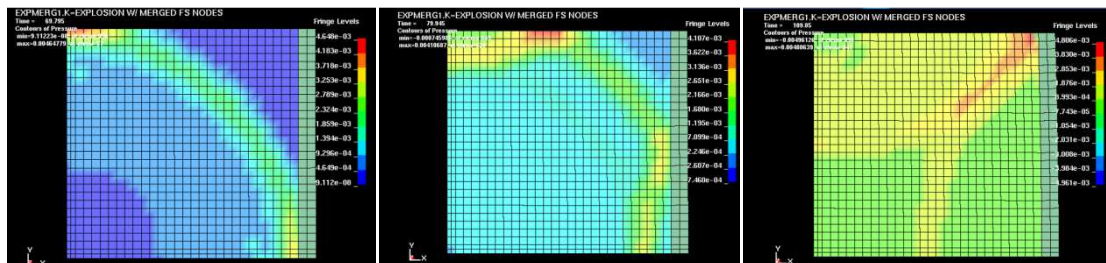


Figura 36 Ejemplo de reflexión de onda en las paredes de una malla ALE

Se implementa a través de la tarjeta citada junto con otra que define un set de 'segmentos'; en LS-DYNA® se entiende como segmento a una de las caras de un elemento volumétrico, sea hexaédrico o tetraédrico. Al aplicarse al contorno del modelo, supone gran cantidad de segmentos y por lo tanto carga mucho el modelo. En el presente caso es razonable, ya que evita más malla ALE, mucho más pesada; en otros, como detonaciones, el fluido (aire) es tan ligero y la malla tan extensa, que se puede obviar el efecto y evitar la tarjeta.

```
*BOUNDARY_NON_REFLECTING
$#      ssid      ad      as
      1      0.000      0.000

*SET_SEGMENT
$#      sid      da1      da2      da3      da4
      1      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
899260  996316  996317  989261  0.000  0.000  0.000  0.000
```

Figura 37 Tarjetas para definir no reflexión de onda

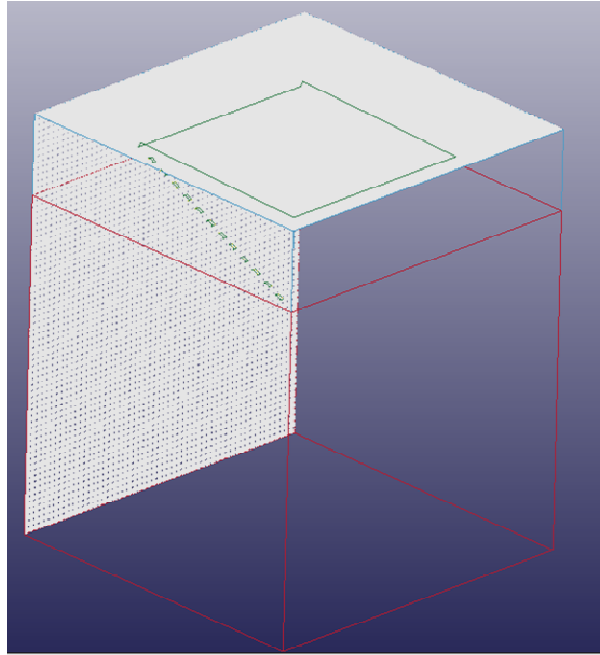


Figura 38 Captura de región de aplicación de la tarjeta de no reflexión

- CONDICIONES INICIALES (*INITIAL)

La cuña será lanzada contra la superficie de agua, así no será necesario calcular la caída libre del cuerpo y será suficiente con aplicarle la velocidad que poseería justo antes de contactar contra el líquido.

La cuña cae desde 1,3 metros de altura, si se ignora los efectos de la viscosidad del aire, es posible obtener la velocidad de llegada mediante la ley de conservación de la energía.

$$Em = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$$

Ecuación 4

$$Em_0 = Em_f$$

Ecuación 5

$$0 + mgh_0 = \frac{1}{2}mv_f^2 + 0 \Rightarrow gh_0 = \frac{1}{2}v_f^2$$

Ecuación 6

Donde:

$$g = 9.800 \frac{mm}{s^2} \quad h_0 = 1300 \text{ mm}$$

Ecuación 7

Por lo tanto:

$$v_f \approx 5300 \frac{mm}{s}$$

Ecuación 8

Esta velocidad se le será aplicada al cuerpo rígido de la cuña mediante una tarjeta específica que posee LS-DYNA.

```
*INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY
$#      pid      vx      vy      vz      vxr      vyr      vzr
        3      0.000      0.000-5300.0000      0.000      0.000      0.000
```

Figura 39 Tarjeta para definir velocidad inicial de la cuña

Se introduce la magnitud de la velocidad en la componente requerida, con las unidades apropiadas y respetando las coordenadas del problema. Hay otras tarjetas para implementar la velocidad que permiten aplicarla en un sistema de coordenadas local concreto y también definir la velocidad o desplazamiento en función de una curva variable-tiempo.

INTERACCIÓN FSI (*CONSTRAINED Y *ALE)

A continuación se procederá a detallar las tarjetas del software que hacen posible la interacción fluido-estructura.

- Tarjetas *ALE

Son un grupo de tarjetas que controlan el desarrollo de la región ALE en el cálculo, desde el desplazamiento de la malla, como su dilatación, compresión, etc. También definen las interacciones entre fluidos, incluso si no comparten *PART en un principio. Aquí serán empleadas para la visualización posterior, definiendo los dos fluidos que potencialmente acoplarán con la estructura, agua y aire.

```
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
$#      sid      idtype      gpname
        1          1
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
$#      sid      idtype      gpname
        2          1
```

Figura 40 Tarjetas de 'multimateriales' ALE

Según se indica cada fluido será definido por una *PART (*idtype*=1), que se corresponden con las dos *PART ALE existentes, *sid* 1 y *sid* 2.

- INTERACCIÓN FSI *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID

Las tarjetas *CONSTRAINED hacen referencia a restricciones que se aplican a las *PART durante el cálculo y que no tienen que ser consecuencia de condiciones de contorno o contactos. La tarjeta *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID, Figura 41, interpreta la interacción fluido-estructura y permite el cálculo de los esfuerzos provocados por la interacción mencionada.

```
*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID
##  slave      master      sstyp      mstyp      nquad      ctype      direc      mcoup
      2         1         2         0         2         4         3         1
##  start      end      pfac      fric      framin      norm      normtyp      damp
      0.0001.0000E+10  0.100000  0.000  0.500000  1         0         0         1
##  cq         hmin      hmax      ileak      pleak      lcldpor      nvent      blockage
      0.000      0.000      0.000      0  0.010000  0         0         0
##  iboxid      ipenchk      intforc      ialesof      lagmul      pfacmm      thkf
      0         0         0         0         0.000      0         0.000
```

Figura 41 Tarjeta de interacción Lagrangiano-ALE

A continuación se comentarán los parámetros más relevantes para el caso.

Slave/master: Indican las entidades que acoplarán. Siempre la estructura será la que reciba las cargas y por lo tanto será *slave*. Para la estructura se puede designar una **PART*, **SET_PART* o **SET_SEGMENT*, para el fluido se indica la **PART* o **SET_PART* por completo; el tipo de entidad se indica con *sstyp/mstyp*.

Ctype: Se indica el tipo de acoplado. En este caso se trata un tipo 4, acoplado con elementos *shell* y *solid* lagrangianos. Se facilita así el seguimiento de la zona de acoplado y se evitan posibles penetraciones de material (*leakage*) ALE a través de la estructura.

Direc: Se indica el sentido a considerar en el acoplado. Se puede considerar normal a la superficie, tanto en compresión, como en compresión y tensión (valores 1 y 2) como considerar todas direcciones (valor 3) si la geometría no acopla de manera plana contra el fluido. Debido a la oblicuidad de la cuña, se ha elegido este aspecto.

Mcoup: Se selecciona el ALE que acoplará. De este modo se puede evitar calcular el acoplado contra determinados fluidos no relevantes o sólo contra aquellos que sean convenientes. Aquí se ha indicado valor 1, que supone que acople sólo contra el material ALE de mayor densidad evitando calcular el acoplado aire-estructura.

Norm: Es un parámetro exclusivo del acoplado contra *shells*. Con él se indica la dirección de los elementos shell, ya que debido a la formulación de este tipo de elemento, puede no registrar los esfuerzos que reciba por el envés del elemento, Figura 42.

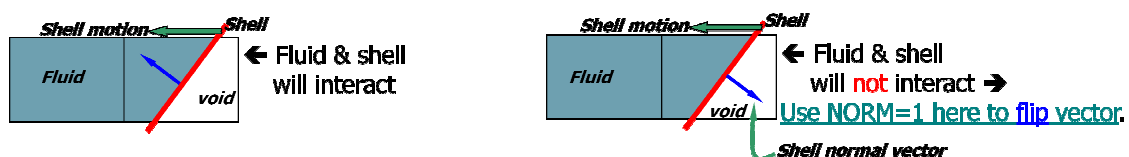


Figura 42 Esquema de dirección de acoplado

SPH

Mucha de la información del modelo es idéntica a la que se emplea en el caso ALE, por lo tanto sólo se indicarán los cambios más relevantes con respecto al otro modelo.

El modelo está compuesto por 3 partes que se enuncian a continuación:

1. Cuña, Figura 43 (*pid* =3): Se trata de un **PART_INERTIA* con material rígido y elementos *shell* como en el caso ALE.

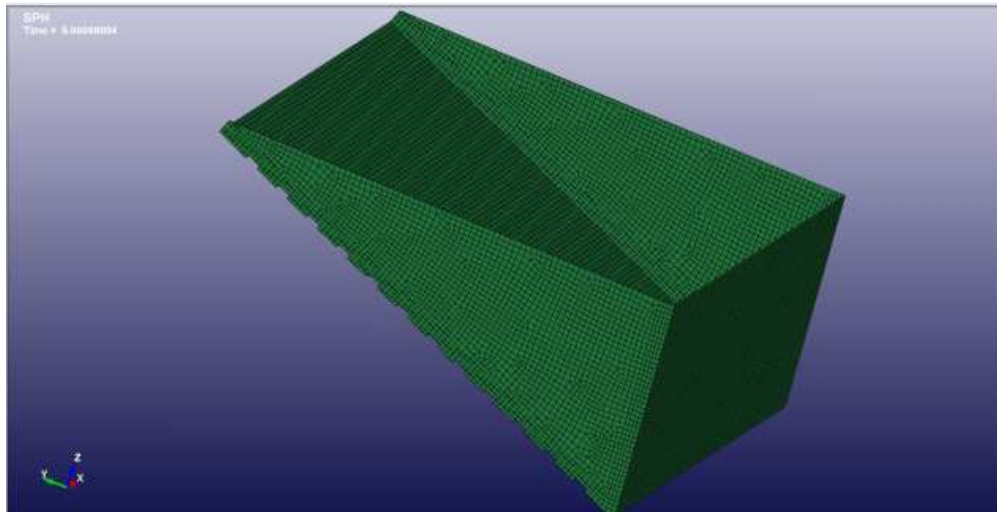


Figura 43 Cuña

2. Zona de transductores, Figura 44 (*pid*=4): También esta parte es heredada del modelo ALE y posee las mismas propiedades que en caso análogo.

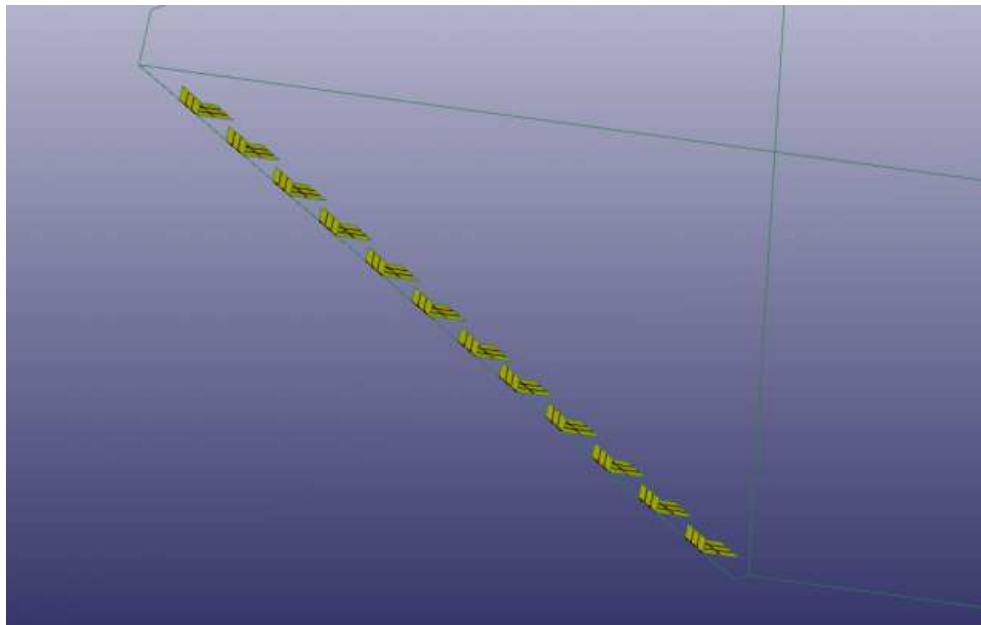


Figura 44 Transductores

3. Agua, Figura 45 (*pid*=6): Se diseña como un bloque de partículas SPH, con una distancia inicial h_0 de cohesión. Se le aplican **MAT_NULL* para el agua y la **EOS_GRUNEISEN* también para agua que se implementaron en el caso ALE.

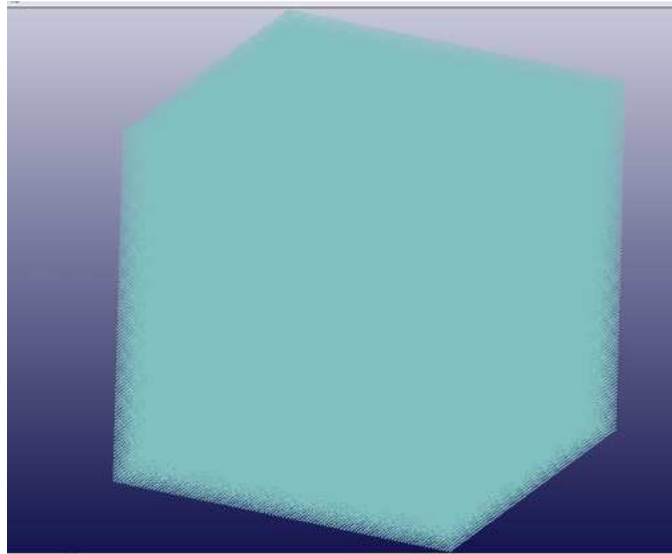


Figura 45 Agua en SPH

En este caso, dada la naturaleza del SPH, sí se tuvieron que definir paredes que limitaran la expansión de las partículas SPH. Aunque el LS-DYNA® las identifique con *pid* 's no son malla y se tratarán en la sección *RIGIDWALL.

- TIPO DE ELEMENTO (*SECTION)

*Section_SPH

```
*SECTION_SPH
$#  secid      cslh      hmin      hmax      sphini      death      start
      6  1.100000  2.000e-2  2.000000    0.0001  1.0000E+20    0.000
```

Figura 46 Tarjeta de sección SPH

La tarjeta que define las partículas SPH es sencilla y para modelizar agua los valores por defecto son válidos. Es relevante indicar que se define aquí la relación entre las partículas SPH, en particular la distancia de suavizado (h_0) y los límites superior e inferior para regular el radio de actuación de cada partícula SPH. Esto se comprueba en el artículo [15].

CONFINAMIENTO, LÍMITES DEL MODELO Y PAREDES

- CONDICIONES DE CONTORNO (*BOUNDARY)

Sólo se mantiene la tarjeta *BOUNDARY_SPC para restringir la cuña, las partículas SPH, al no estar ligadas a una malla, se deben de confinar ya que la falta de malla permite que puedan desplazarse por todo el medio.

En el caso SPH, restringir el desplazamiento de los elementos del exterior no evita que el resto de partículas, que no tienen coartada su topología, se desplacen libremente, superando el plano de restricción. LS-DYNA® también posee una tarjeta que define planos de simetría para SPH pero, como le ocurre con ALE, está supedita a un único plano por caso. Por lo tanto, se emplean tarjetas *RIGIDWALL y *RIGIDWALL_PLANAR que modelizan planos en los que sólo se permiten esfuerzos tangenciales, evitando tener que mallarlos y

que considerarán todas las partículas SPH, considerando la potencialidad de un hipotético contacto.

```

*RIGIDWALL_PLANAR
$#      nsid      nsidex      boxid      offset      birth      death      rwksf
      1          0          0          0.000      0.0001.0000E+20      1.000000
$#      xt          yt          zt          xh          yh          zh          fric          wvel
1600.0000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*RIGIDWALL_PLANAR
      1          0          0          0.000      0.0001.0000E+20      1.000000
      0.000      0.000-1000.0000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*RIGIDWALL_PLANAR
      1          0          0          0.000      0.0001.0000E+20      1.000000
      0.000      0.000      0.000      0.000      1000.0000      0.000      0.000      0.000
*RIGIDWALL_PLANAR
      1          0          0          0.000      0.0001.0000E+20      1.000000
      600.00000      0.000      0.000      1600.0000      0.000      0.000      0.000      0.000
*RIGIDWALL_PLANAR_FFINITE
$#      nsid      nsidex      boxid      offset      birth      death      rwksf
      1          0          0          0.000      0.0001.0000E+20      1.000000
$#      xt          yt          zt          xh          yh          zh          fric          wvel
600.00000      1000.0000-1000.0000      600.00000      0.000-1000.0000      2.000000      80.000000
$#      xhev          yhev          zhev          lenl          lenm
1600.0000      1000.0000-1000.0000      1000.0000      1150.0000

```

Figura 47 Tarjetas de paredes ideales

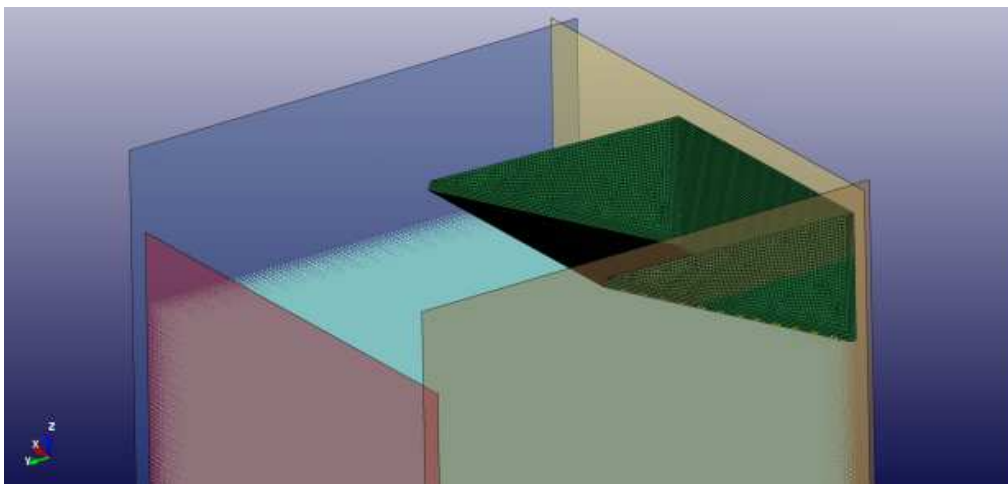


Figura 48 Disposición de las paredes ideales

La particularidad de la tarjeta `*RIGIDWALL_PLANAR_FFINITE` reside en que, con ella, se puede definir un plano finito según un punto, un sistema de coordenadas y las longitudes de los lados del plano en dos direcciones del sistema de coordenadas. Es una herencia de los primeros casos, en los que, debido a un incorrecto modelizado, el fluido escapaba, dibujando una ola, hasta que se detenía por efecto de la pared infinitamente extensa, lo que dejaba una imagen de irrealidad que se procuró evitar. La función de este plano finito es dejar salir aquellas partículas que superan una cota concreta, establecida empíricamente a tenor de los primeros casos citados, y que dibujan la cresta de una ola, hecho que no responde al concepto de ola como transmisión de energía sin transmisión de fluido y sí expulsan partículas fuera del entorno del caso.

INTERACCIÓN FSI (*CONTACT)

La tecnología SPH provoca que las partículas generadas por este método, tengan más similitudes con elementos Lagrangianos que los elementos ALE. Cada partícula representa

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

un valor constante de material, por lo cual, la interacción no buscará el material existente en cada momento para la malla de fluido, si no que la entidad relevante de provocar esfuerzos será el nodo que defina la partícula SPH con su materia asociada, de esta manera, la interacción entre estructura y SPH será resuelta con una tarjeta **CONTACT*, igual a las que se emplearía en un contacto Lagrangiano-Lagrangiano.

```

*CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE_SMOOTH_ID
$#      cid                                     title
      1
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      6          1          3          0          0          0          0          1
$#      fs        fd        dc        vc        vdc        penchk        bt        dt
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.010000      0          0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
      1.000000      0.800000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
$#      soft      sofscl      lcidab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
      1          0.100000      0          1.025000      2.000000      2          0          1
$#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
      0.000          0          0          0          0          0          0.000      0.000
$#      igap      ignore      dprfac      dtstif      unused      unused      flangl
      1          0          0.000      0.000          0          0          0.000

```

Figura 49 Tarjeta de contactos

LS-DYNA® posee numerosas tarjetas para definir distintos tipos de contacto, en función de las mallas envueltas, la previsibilidad del contacto o el comportamiento esperado. En este caso se ha empleado una tarjeta **CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE_SMOOTH* que, aparte del funcionamiento explicado en la página 17, actúa de la siguiente manera:

Es un contacto de los denominados *AUTOMATIC*, esto supone que, aún cuando se redirigieron al mallar, se trazará la penetración para el contacto, independientemente de la dirección del segmento, con respecto a los nodos, esto es útil para garantizar contactos aún cuando haya grandes deformaciones. El subtítulo *SMOOTH* supone que, a la hora de trazar la superficie de contacto, la ajusta a una superficie curvada evitando los filos provocados por las aristas de cada elemento; este ajuste evita 'ruido de contacto' y la interacción es más homogénea y continúa que contactando de manera genuina.

A la hora de indicar las entidades en contacto, hay una divergencia con respecto al acoplado Lagrangiano-ALE, en este caso la entidad *slave* será el conjunto de partículas SPH, definida como la **PART* (*sstyp*=3) SPH (*ssid*=6) y la entidad *master* se define como el **SET_SEGMENT* (*sstyp*=0 y *msid*=1) que, dado que se emplean shells, consiste en la propia geometría exterior de la cuña.

4.1.1.2 COMBINACIÓN SPH Y LAGRANGIANO: MODELOS 'COMBINADOS'

Se emplea esta configuración por el siguiente motivo: la tecnología SPH conlleva gran cantidad de nodos para rellenar una geometría determinada; estos nodos, al no estar ligados a una malla y poseer una elevada libertad de movimiento, deben ser considerados en conjunto al definir regiones de contacto, lo que provoca contactos pesados, sin mencionar también el cómputo por la interacción entre sí, por todo ello, si se limita la existencia del SPH a la región de mayor deformación, zona de impacto y alrededores, se sigue favoreciendo al cálculo de las ventajas de esta tecnología, consiguiendo un comportamiento hidrodinámico muy aceptable al entorno Lagrangiano sin que penalice tanto el cálculo.

Por otra parte, el hecho de emplear elementos lagrangianos responde a la facilidad de implementar la interacción SPH-Lagrangiano y la dificultad que existe en conectar elementos ALE y SPH. Pese a emplear material fluidodinámico en la parte Lagrangiana, se puede usar una tarjeta de contacto, idéntica a la que se emplea para la interacción entre la cuña y las partículas SPH. Si se buscara emplear ALE junto con SPH, sería necesario definir una 'piel' intermedia, modelada con *shells* lagrangianas, muy fina y flexible, que contacte con las partículas SPH por una cara, y acople con el material ALE por la otra, ya que LS-DYNA® no es capaz de definir interacción entre ALE y nodos libres.

De este modo, analizando los casos previos en ALE, se mide la profundidad que alcanza la cuña desde la cota inicial del agua; así se puede considerar hasta qué profundidad puede haber elevados gradientes de deformación. Por debajo de este punto, se sustituyen las partículas SPH por un bloque de elementos lagrangianos regulares y se implementa el contacto entre las dos partes de fluido. Según se verá más adelante (página 46), la cuña se sumergirá aproximadamente 200 milímetros por debajo del nivel del agua, por lo tanto esa será la profundidad de la región SPH.

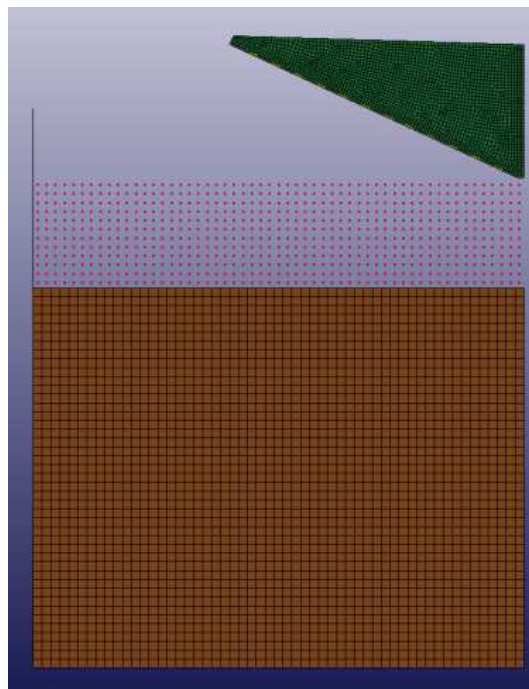


Figura 50 Captura de la disposición combinada

De este modo se pretende conocer las capacidades de la tecnología SPH, evaluando la diferencia de comportamiento con un fluido íntegramente formado de partículas, evitando el problema de peso de cálculo que conlleva.

4.1.2 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

En el presente apartado se van a analizar los resultados obtenidos de los cálculos generados a través del programa de cálculo. Se pretende exponer las principales diferencias entre los métodos de cálculo propuesto previamente.

Se parte de unos resultados experimentales, extraídos del llamado ‘ensayo patrón’, que servirán como verificación de los datos; por otro lado se manejarán diversos resultados obtenidos de los casos generados. Los casos generados son distintas versiones y modificaciones de una misma tecnología FSI; se pretende con ello analizar, no sólo las diferencias entre tecnologías, si no también, las diferencias en la solución del cálculo en función de parámetros relevantes dentro de un mismo tipo de FSI.

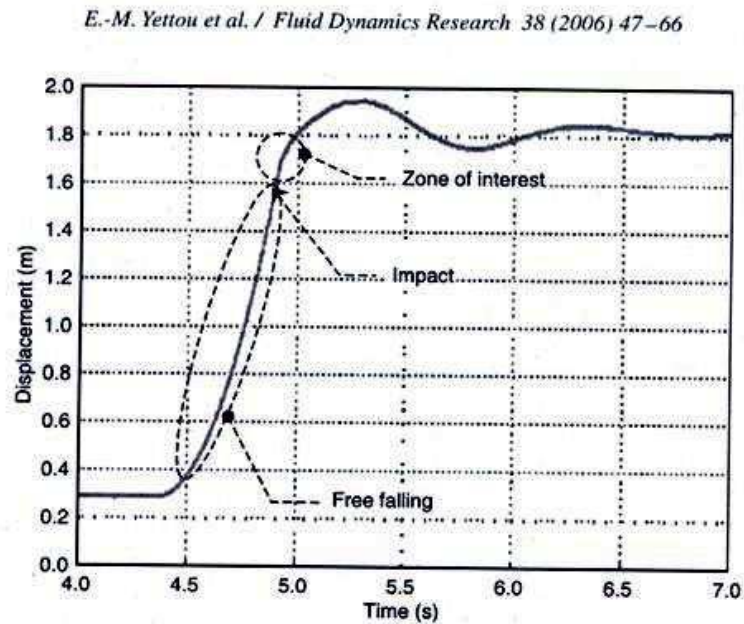
Los resultados que se analizarán principalmente son aquellos que se denominarán, en adelante, resultados ‘cinéticos’: histogramas de desplazamiento y velocidad de la cuña en su inmersión. El comportamiento del solver a la hora de alcanzar estos resultados es crucial de cara al estudio de *ditching*; los histogramas cinéticos serán los únicos valores que se compararán en el caso del amerizaje. También se compararán los tiempos de cálculo de cada uno de los métodos para un estudio ‘tiempo-precisión’; esto disipará dudas para elegir el método óptimo de cálculo según las necesidades.

Por último se mostrará, a título informativo, los resultados de presiones obtenidos en los cálculos y su relación con los valores medidos en el ‘ensayo patrón’; cómo varían según la tecnología FSI y cómo están fuertemente ligados a los algoritmos de acoplado y contacto del programa.

4.1.2.1 EXTRACCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

Para realizar este apartado fue necesario extraer y traducir los datos experimentales a un formato que permitiera combinarlos con los resultados calculados.

Los resultados del ensayo patrón *Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge* se encuentran publicados en gráficas, como muestra la Figura 51, esto hizo necesario escanear a alta resolución dichas gráficas para poder manipularlas.



it recorded by the cable position transducer (deadrise angle $\alpha = 25^\circ$; mass of the wedge m).

Figura 51 Histograma de desplazamientos del experimento de [16]

Gracias al programa *Engauge Digitizer* se pueden traducir imágenes de gráficas en tablas de valores.

El procedimiento es el siguiente: Se inicia el programa y se importa la imagen gráfica a traducir.

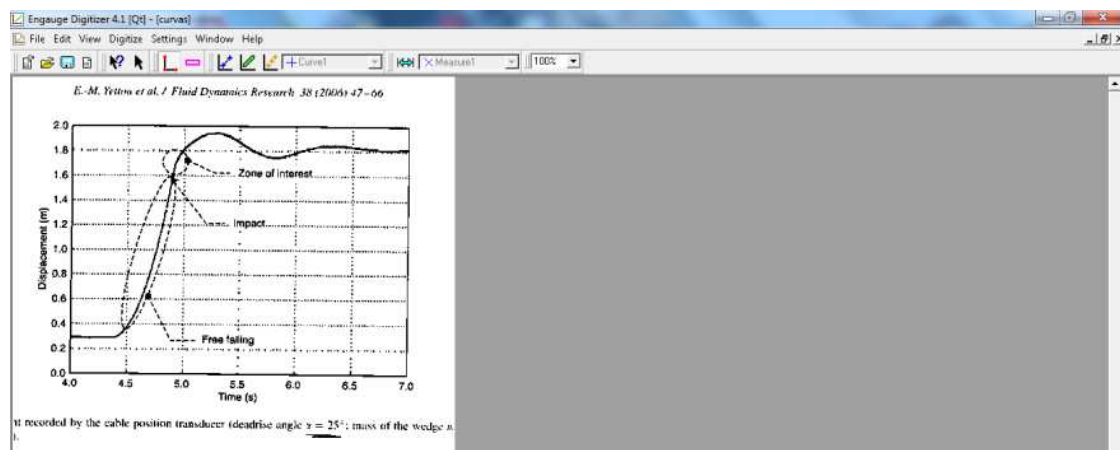



Figura 52 Captura del programa de lectura

Una vez importada es conveniente tratarla para mejorar la definición de la curva. A continuación, Figura 53, se definen los ejes de coordenadas de la curva , haciendo clic en su posición y anotando sus valores (0,0; 0,y_{max}; x_{max},0).

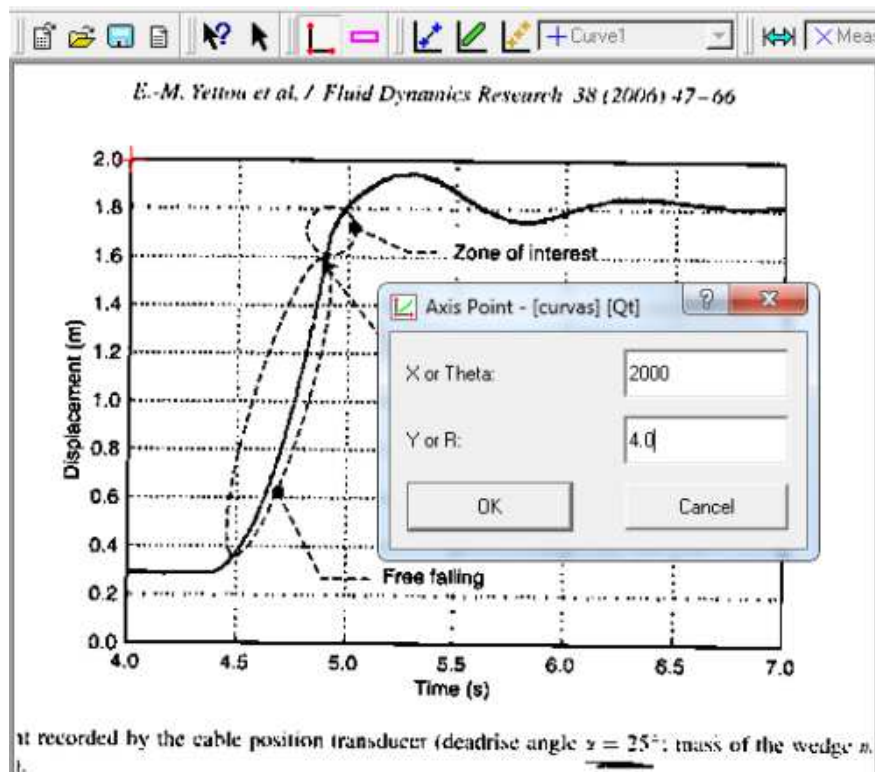


Figura 53 Definición de ejes de coordenadas

El programa determinará si se ha hecho la definición correctamente con un mensaje en la parte inferior derecha de la pantalla, Figura 54:

The three axis points are correctly defined.

Figura 54 Confirmación

Una vez definidos los ejes de coordenadas se procede a marcar los puntos que definirán la curva.

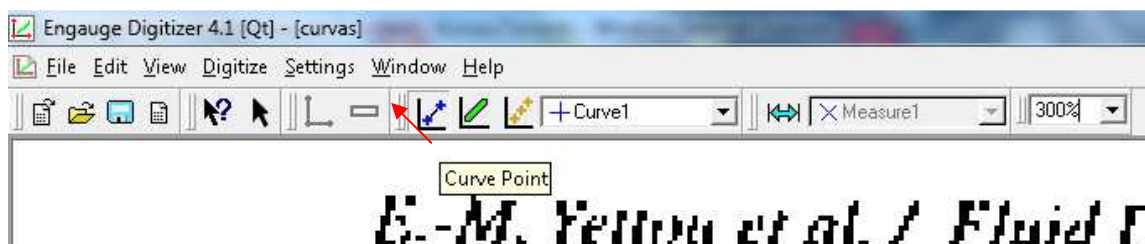


Figura 55 Marcación de puntos

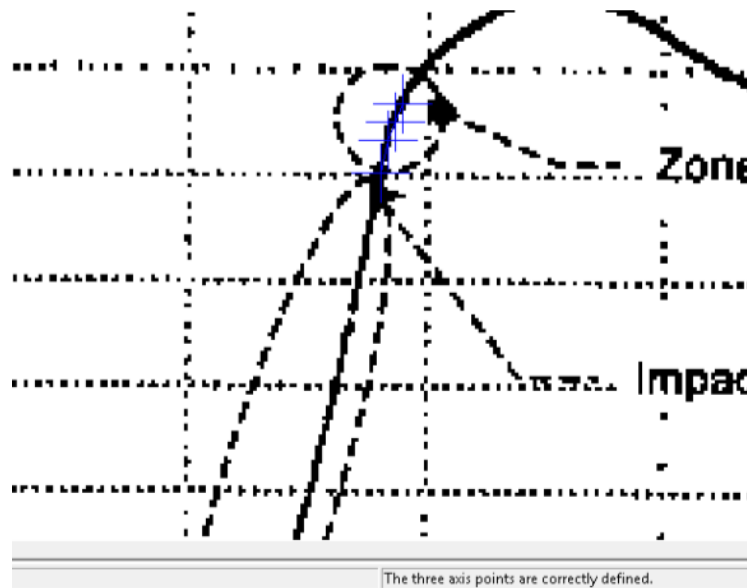


Figura 56 Definición de puntos de la curva

Se definen los puntos que se consideren necesarios, Figura 56, estos puntos serán los pares de coordenadas que el programa traducirá y devolverá para poder emplearlo en un programa apropiado como Excel® de Microsoft®.

Cuando se hayan dibujado los puntos de la curva, se le pide al programa que lo discretice según la Figura 57:

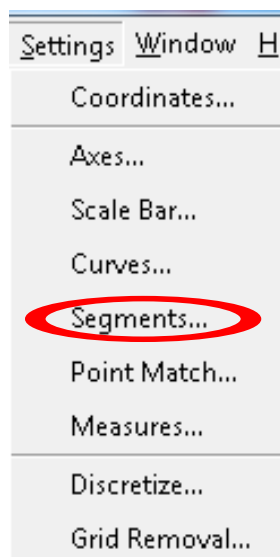


Figura 57 Discretización

Y finalmente se exporta de manera que escribe un archivo .txt UNICODE con los pares de datos. Este archivo se deberá editar para que sea legible por los programas de tratamiento de datos.

En este trabajo se empleará el mismo software de preprocesado de LS-DYNA®, el Lsprepost, que permite trabajar fácilmente con curvas de datos; el principal motivo de esta decisión fue la imposibilidad de combinar en Excel tablas de datos con diferentes valores en las abscisas, como ocurría entre las curvas del cálculo y las curvas extraídas del ensayo

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

patrón; el resultado era varias curvas superpuestas en las que, las que compartían valores de abscisas (las curvas del cálculo) aparecían correctamente, mientras que la curva experimental, con otros valores en el eje X, mostraba puntos con su valor correcto de ordenada pero con un valor de abscisa incorrecto, correspondiente a su posición en la tabla.

Debido a ciertos aspectos que difieren entre el ensayo y el cálculo, como son los orígenes de medida o las unidades empleadas, es necesario posteriormente aplicar transformaciones a las curvas del ensayo para así poder compartir origen y magnitud entre las curvas a comparar. Este procedimiento se podrá observar en el punto siguiente durante el proceso de estudio de datos.

4.1.2.2 COMPARATIVAS

Cabe indicar que, aparte de la división producida por la tecnología FSI, hay una subdivisión referente al grado de refinado de la malla, estableciéndose 3 grupos en cada tecnología de 10, 12 y 18 mm de longitud característica en la malla de fluido. Por otro lado, en algunas familias de casos, se puede apreciar evoluciones, indicadas con letra, que especifican variaciones concretas en los casos.

MODELOS ARBITRARY LAGRANGIAN EULERIAN

- Tamaño de modelos y tiempo de cálculo

La primera comparativa comienza con el grupo ALE que está formado por los siguientes cálculos:

- **ALE con arista de elemento 10 milímetros (archivo=30.03.11.k)**
 - Calculado en 31 horas y 28 minutos mediante 5 procesadores.
 - Compuesto de 1.293.719 nodos; 18.409 *shells* pertenecientes a la cuña y 1.240.000 sólidos ALE entre agua y aire.
- **ALE con arista de elemento 12 milímetros (archivo=24.03.11.k)**
 - Calculado en 22 horas y 19 minutos mediante 5 procesadores.
 - Compuesto de 752.400 nodos; 18.409 *shells* pertenecientes a la cuña y 709.567 sólidos ALE entre agua y aire.
- **ALE con arista de elemento 18 milímetros (archivo=29.03.11.k)**
 - Calculado en 8 horas y 11 minutos mediante 5 procesadores.
 - Compuesto de 234.978 nodos; 18.409 *shells* pertenecientes a la cuña y 205.700 sólidos ALE entre agua y aire.

Lo primero que salta a la vista a la hora de comparar los casos es la relación entre número de elementos y tiempo de cálculo. Como es conveniente diseñar la malla ALE de la manera más regular posible, los elementos resultantes son próximos a cubos, por lo que, al disminuir su arista, el número de nodos aumenta de manera casi exponencial, como demuestra la Figura 59, de tal forma que de la misma manera aumentarán las ecuaciones a resolver por el solver. Por otro lado, suponiendo que se disponga de procesadores suficientes como para igualar la relación de nodos por núcleo de procesado, por lo explicado para el cálculo explícito en la página 10, se vería una velocidad de cálculo menor

cuanto menor fuese la longitud característica de los elementos críticos, en este caso los elementos ALE que acarrearán más procesamiento que los elementos lagrangianos habituales.

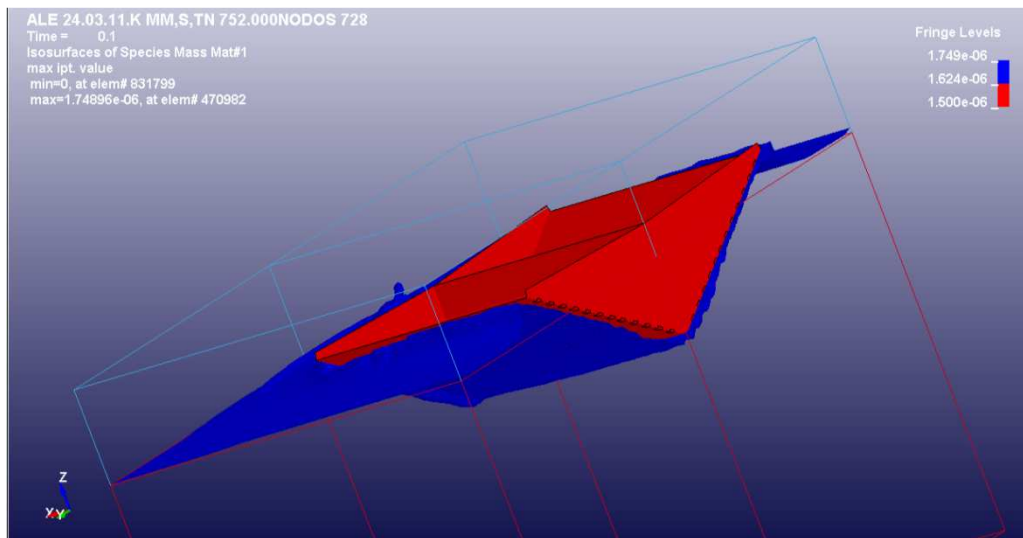


Figura 58 Postprocesado de un cálculo ALE

A tenor de las diferencias de tiempo, es crítico conocer la aproximación de los resultados. Una diferencia mínima en la precisión de las soluciones apoyaría el uso de una malla menos refinada, por lo tanto, menor tamaño de archivos y mayor velocidad de cálculo.

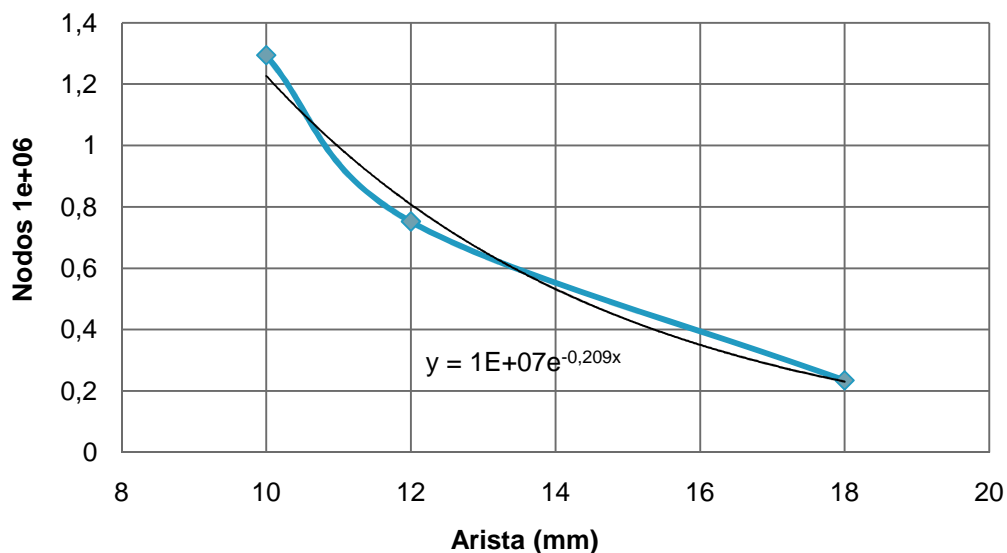


Figura 59 Relación entre número de nodos y longitud de arista

- Desplazamientos

Para contrastar desplazamientos se empleará la Figura 7 del artículo [16]; esta Figura muestra la gráfica que recoge el desplazamiento sufrido por el transductor de posición de la cuña. Se trata del caso en el que la cuña posee 25 grados de ángulo de bisel, 94 kilogramos y lanzado desde 1300 milímetros de altura.

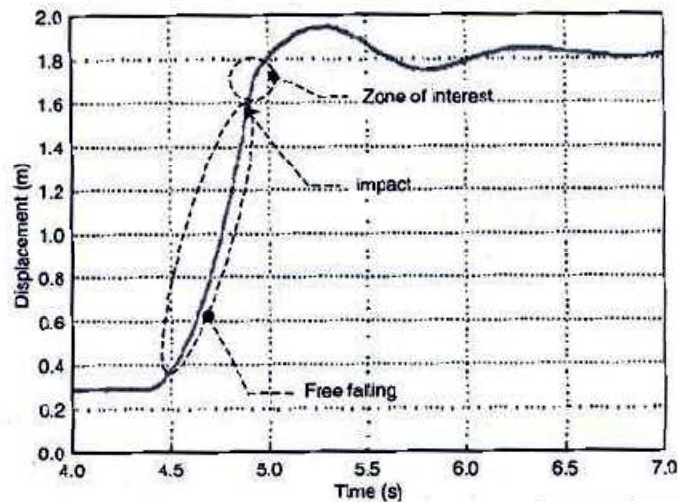


Figura 60 Figura 7 del artículo [16]

De dicha gráfica, de la manera que se explica en el apartado '*Extracción de datos experimentales*' en la página 41; se extraerá y traducirá para su manejo la parte denominada '*Zone of interest*', Figura 61, que describe el desplazamiento en los primeros instantes tras el impacto contra el agua.

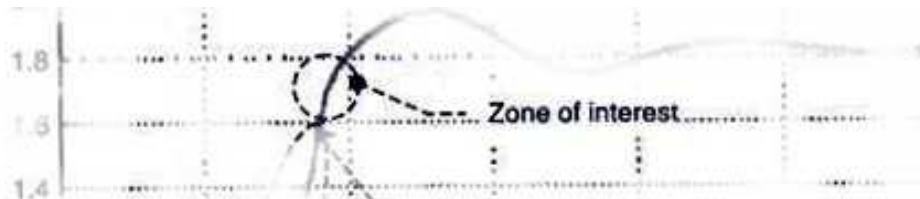


Figura 61 Zona de interés

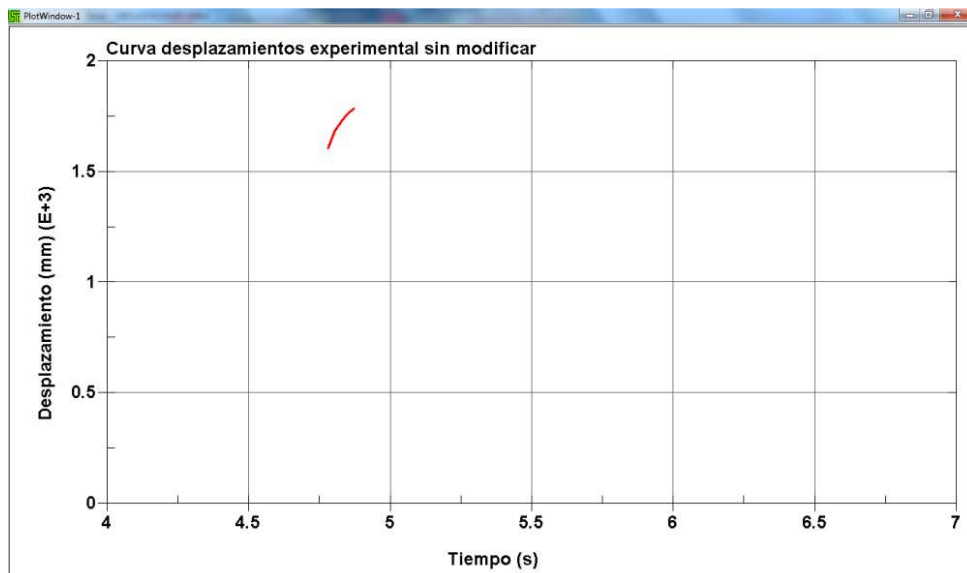


Figura 62 Traducción a gráficas de LS-DYNA®

Una vez importada la curva es necesario ajustarla para que concuerde con las curvas de los cálculos, es necesario ajustar tres aspectos, el rango de tiempos, el desplazamiento irrelevante y el origen de magnitudes:

- Los cálculos comienzan en el instante que impacta contra el agua, por lo tanto hay que suprimir el tiempo que recorre durante la caída. Esto supone recortar desde los 4 segundos que comienza el eje de abscisas hasta aproximadamente 4,893 segundos.
- Después, según recogen en el artículo del experimento, punto 3.1. página 53 (dentro de un rango de páginas de 47 a 66) '*Pressure time history raw data*', la zona de interés ocurre durante un período cercano a los 50 milisegundos después del impacto. Permitiendo un tiempo prudencial para desarrollar los cálculos de 100 milisegundos, como se indica en el apartado *MODELO EN ELEMENTOS FINITOS*, página 22, suprimimos el tiempo existente 100 milisegundos después del instante de impacto, esto es, desde los 4,993 segundos hasta los 7 segundos que alcanza el eje de abscisas.
- En el eje de ordenadas indicar que, dentro de los márgenes temporales previamente definidos, se obtuvo un desplazamiento máximo de 200 milímetros, que son los que existen entre 1,6 y 1,8 segundos. Por lo dicho, se acota el eje de ordenadas entre los 1,6 y 1,8 segundos.
- Para acabar, hay que indicar que, al contrario que en el experimento que el origen está en lo alto del raíl, a 1,3 metros sobre la superficie de agua, el origen de coordenadas de los cálculos está en la superficie del agua por lo que los, aproximadamente, 200 milímetros de desplazamiento deben mostrarse negativos y comenzando desde el cero en el eje de ordenadas.

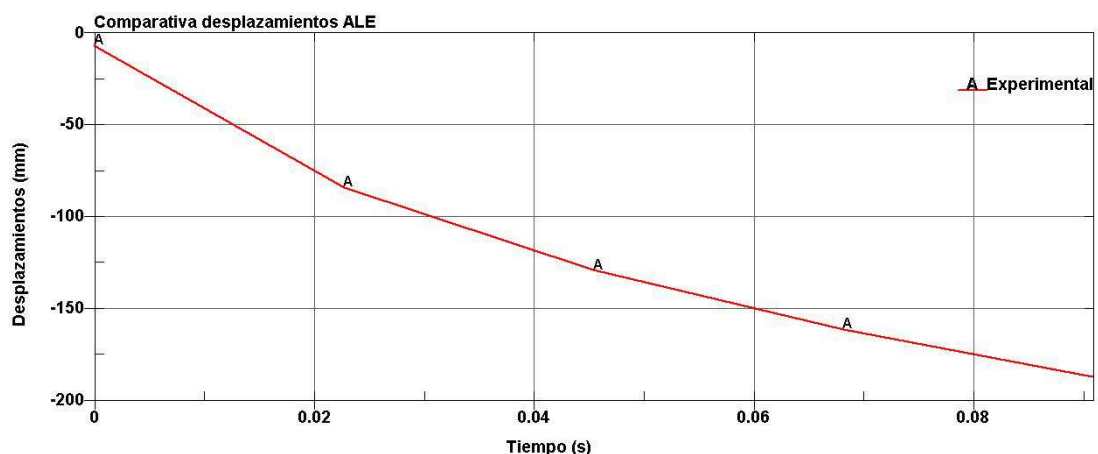


Figura 63 Histograma de desplazamientos reales

Una vez realizados los ajustes la curva experimental de desplazamientos está preparada para ser comparada con sus homólogas en los cálculos.

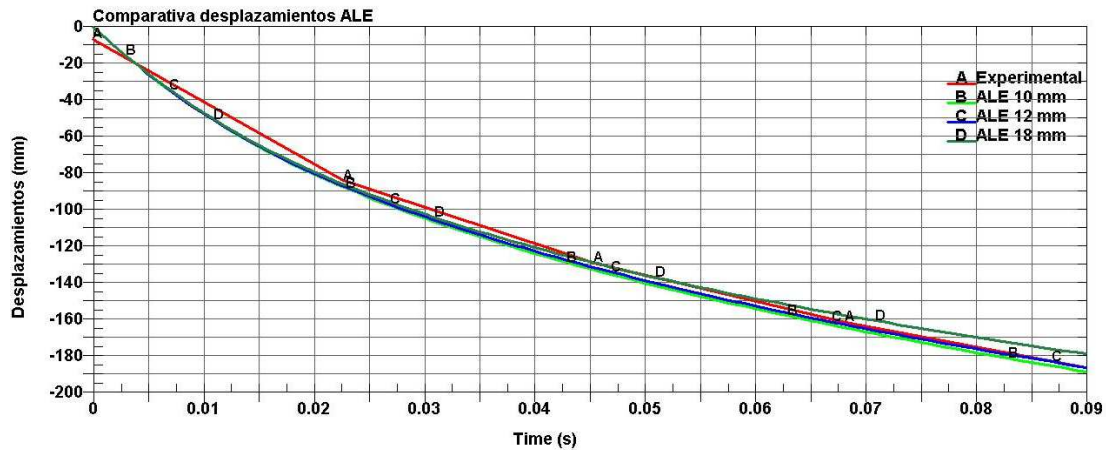
MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

Figura 64 Comparativa desplazamientos modelos ALE y caso real

La primera impresión que se extrae de la Figura 64 es la proximidad en los resultados; salvo el caso ALE de 18 milímetros en la segunda mitad del cálculo, los otros dos casos manejan curvas de desplazamientos prácticamente idénticas y aún así, en el instante final (0.09 segundos) la variación con el valor final de la curva experimental es de 5 milímetros, un 2,5 por ciento de error. Se puede decir, en un primer momento, que la mejora en comportamiento para el caso ALE_10_mm respecto al caso de 12 milímetros no justifica una diferencia de tiempo de algo más de 9 horas (549 minutos) según veíamos en la página 45.

- Velocidades

Para contrastar velocidades se empleará la Figura 8 del artículo [16]; esta figura muestra la gráfica que recoge el desplazamiento sufrido por el transductor de posición de la cuña. Se trata del caso en el que la cuña posee 25 grados de ángulo de bisel, 94 kilogramos y lanzado desde 1300 milímetros de altura.

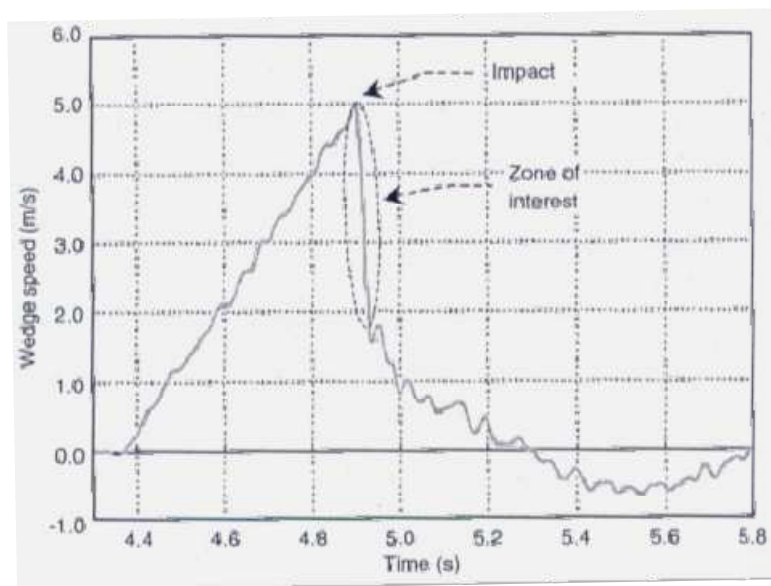


Figura 65 Curva de velocidades del artículo [16]

De dicha gráfica, de la forma que se explica en el apartado ‘*Extracción de datos experimentales*’ en la página 41, se extraerá y traducirá para su manejo la parte denominada ‘*Zone of interest*’, que describe una línea recta casi vertical antes de la oscilación resultante de la inmersión. Hay que indicar en este momento una singularidad encontrada en los datos: según el artículo [16], la velocidad de impacto de la cuña se trata de 5 metros por segundo cuando, según el cálculo de energías realizado en la página 33, la velocidad alcanzada tras una caída de 1,3 metros es de 5,3 metros/segundo que fue la velocidad implementada en el modelo. Se mostrará que, pese a este 5,7 por ciento de diferencia, la proximidad de resultados es grande y que el solver consigue unos valores muy aceptables también en velocidad.

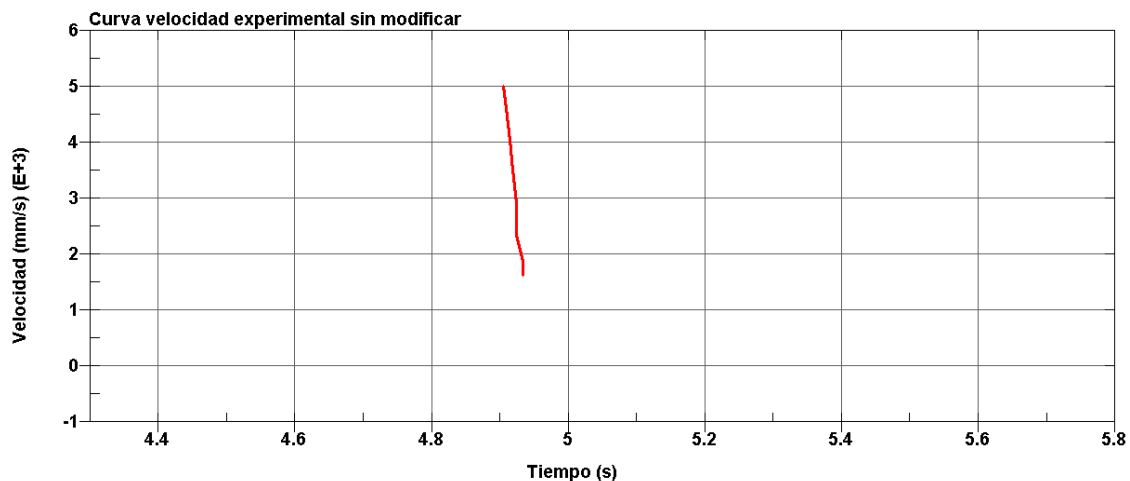


Figura 66 Histograma de velocidad traducido a LS-DYNA®

Debido a la configuración de los ejes de la gráfica que nos proporciona el artículo, la calidad de medida de los puntos de la curva no puede ser muy alta. No se puede obtener con garantías una traducción de la curva para el orden de medida de milisegundos. Por lo tanto, no se espera una gran aproximación de las curvas de las soluciones a la curva de velocidad extraída del caso real.

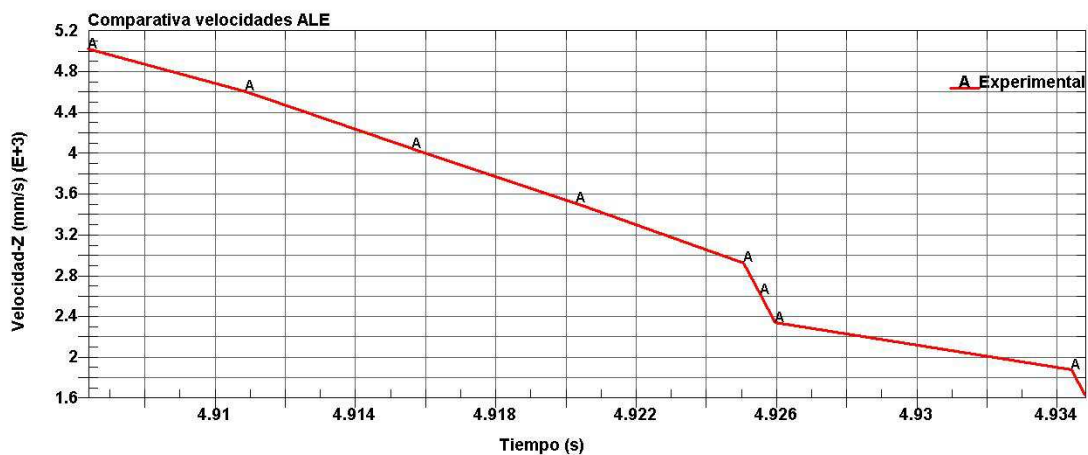


Figura 67 Redibujo del histograma de velocidades reales

Tras esta exposición de la curva experimental se añade para comparar las curvas ALE en un rango de 30 milisegundos, rango que acota la llamada ‘zona de interés’ de la Figura 65

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

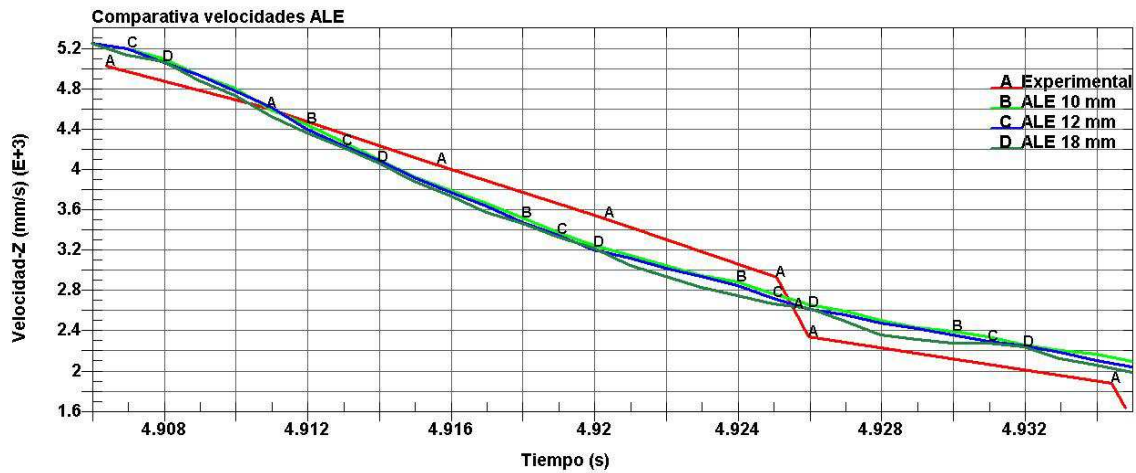


Figura 68 Comparativa de velocidades entre casos ALE y caso real

Pese a la deriva sufrida por los datos experimentales y la singularidad de la velocidad de entrada, se puede aceptar el hecho de que los valores de velocidad en los cálculos son coherentes. La mayor diferencia es de, aproximadamente, 0.3 metros por segundo correspondiente a 4.926 segundos o 20 milisegundos tras el impacto contra el agua. Al igual que ocurriría con los desplazamientos, también se ve que las tres curvas de los casos ALE tiene mucho similitud por lo que no es justificable emplear el caso con la malla más refinada, en este caso, el de 10 milímetros de arista por elemento ALE.

MODELOS 'COMBINADOS'

La segunda comparativa continúa con el grupo 'combinados' que está formado por los siguientes cálculos:

- **MIX 10 mm, con separación de 10 milímetros entre partículas SPH y entre regiones de fluido (archivo=lan-sph_10mm.k)**
 - Calculado en 42 horas y 44 minutos mediante 5 procesadores.
 - Compuesto de 376.578 nodos, de los cuales 220.000 son partículas SPH y el resto nodos de elemento lagrangiano; 18.409 *shells* que pertenecen a la cuña y 130.075 elementos lagrangianos fluidos.
- **MIX 12 mm, con separación de 12 milímetros entre partículas SPH y entre regiones de fluido (archivo=lan-sph_12mm.k)**
 - Calculado en 38 horas y 20 minutos mediante 5 procesadores.
 - Compuesto de 280.580 nodos, de los cuales 124.002 son partículas SPH y el resto nodos de elemento lagrangiano; 18.409 *shells* que pertenecen a la cuña y 137.984 elementos lagrangianos fluidos.
- **MIX 18 mm, con separación de 18 milímetros entre partículas SPH y entre regiones de fluido (archivo=lan-sph_18mm.k)**
 - Calculado en 8 horas y 23 minutos mediante 5 procesadores.
 - Compuesto de 192.878 nodos, de los cuales 36.300 son partículas SPH y el resto nodos de elemento lagrangiano; 18.409 *shells* que pertenecen a la cuña y 137.984 elementos lagrangianos fluidos.

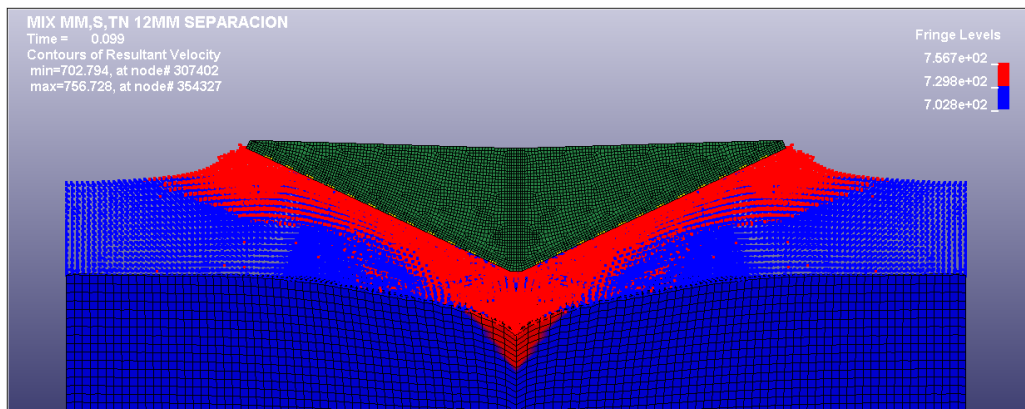


Figura 69 Postproceso de un cálculo combinado

- Tamaño de modelos y tiempo de cálculo

En el caso de los modelos 'combinados', mirando a la Figura 70 también se ve un crecimiento exponencial en el número de nodos en función de la distancia. El crecimiento sólo es provocado por las partículas SPH, ya que, gracias a la capacidad de los contactos en el solver, no es necesario remallar los elementos lagrangianos, ni de fluido ni de la cuña.

Por otro lado, se puede observar el peso de cálculo debido a las partículas SPH. Se puede considerar una cantidad de computación fija asociada a la cuña y al fluido lagrangiano, que no varían, y los incrementos de tiempo son asociados al incremento de partículas SPH, que deben ser consideradas en su totalidad a la hora de considerar las interacciones con el resto de cuerpos del cálculo.

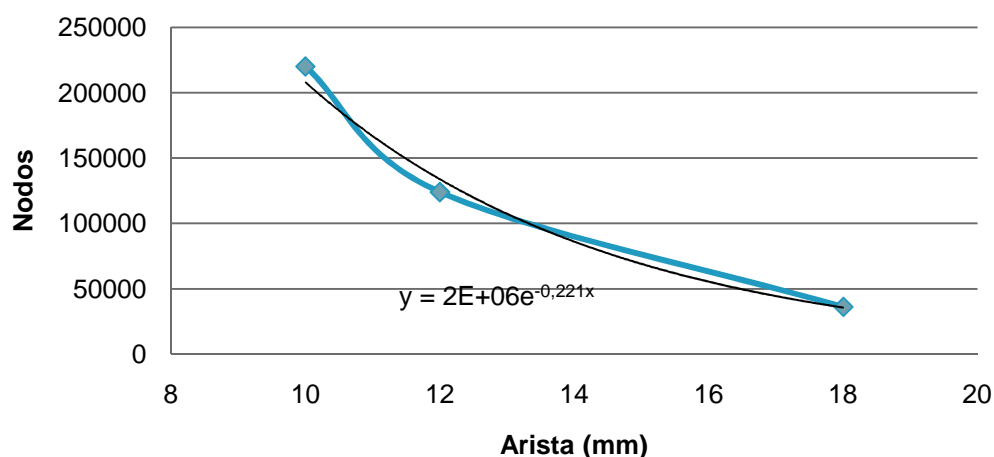


Figura 70 Relación número de nodos y separación de las partículas SPH

- Desplazamientos

Seguidamente se planteará la comparativa de la curva de desplazamientos obtenidos mediante los modelos 'combinados'. Para comparar los desplazamientos emplearemos,

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

aparte de la curva experimental, una de las curvas 'ALE' para calibrar la precisión entre métodos FSI.

La curva experimental se configurará igual que para ALE de tal modo que se ajuste a las magnitudes de las curvas combinadas, Figura 71.

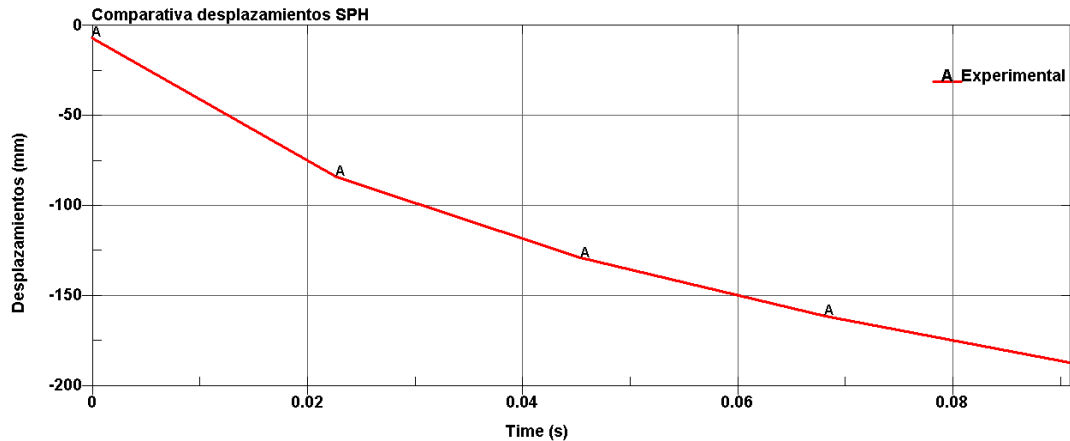


Figura 71 Curva de desplazamientos reales

La curva ALE y las curvas SPH poseen la misma configuración con lo que no necesitan grandes ajustes previos.

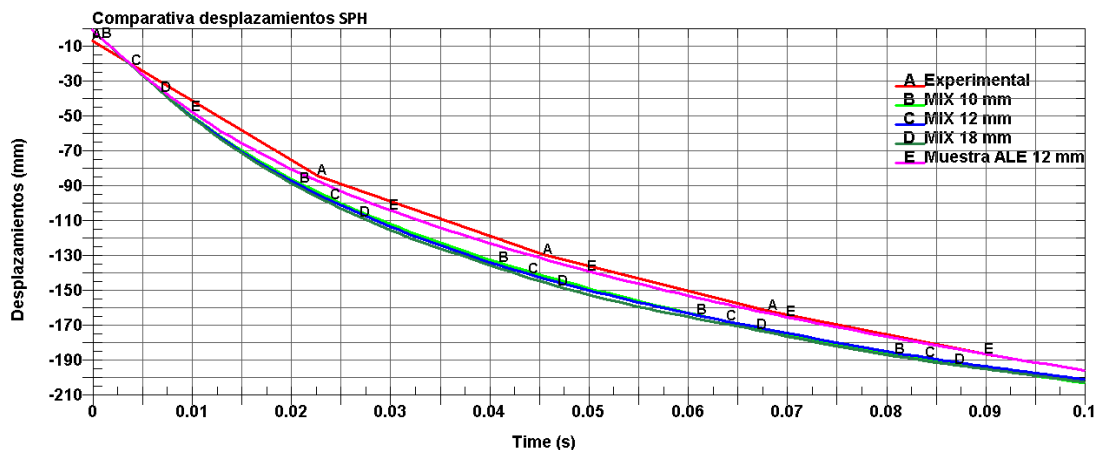


Figura 72 Comparativa de desplazamientos de casos combinados y desplazamientos reales

Los resultados de los casos 'combinados' son las curvas 'B', 'C' y 'D', las curvas 'experimental' y 'muestra' de ALE son las 'A' y 'E', Figura 72.

Lo primero que salta a la vista es la uniformidad en los resultados 'combinados': Independientemente de la densidad de partículas SPH, el desplazamiento registrado por la cuña es a todos los efectos el mismo. Esto es importante de cara al tiempo empleado por cada uno, donde el más lento (MIX 10 mm: 42 horas) lo es cinco veces más que el más rápido (MIX 18 mm: 8 horas) y por lo tanto ese grado de refinamiento puede ser innecesario. Donde una alta densidad de partículas adquiere sentido es a la hora de predecir lo que se denominan *superficies libres*: Tras un impacto debido a la interacción fluido-estructura, las partículas salen despedidas recorriendo nuevas regiones, los límites

que forman las partículas en su tránsito libre de fuerzas es la superficie libre. Esto se ve en la Figura 73:

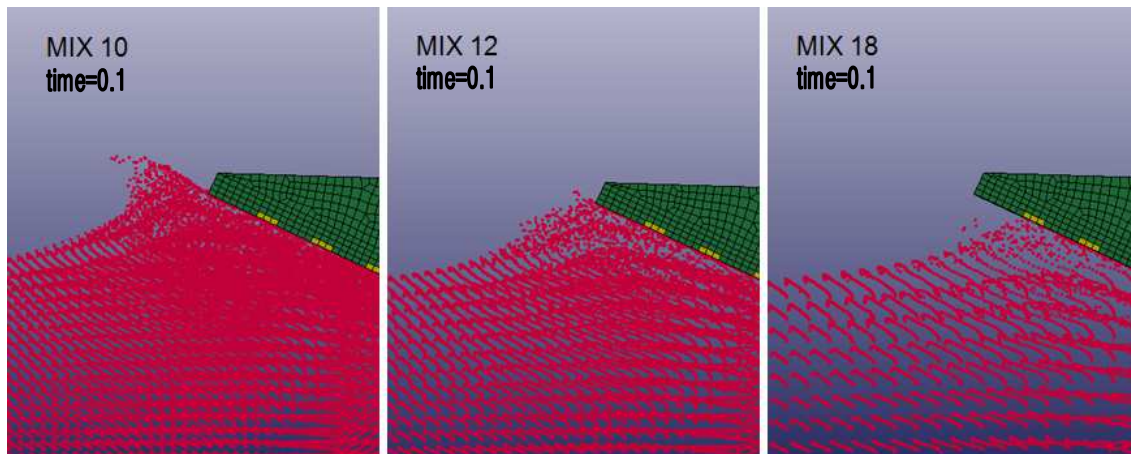


Figura 73 Detalle del dibujo de la superficie libre según la densidad del medio SPH

Por otro lado, regresando a la Figura 72 también se ve que los valores SPH divergen del comportamiento experimental entre 5 y 10 milímetros lo que supone un 5 por ciento de error de medida, un error asumible teniendo en cuenta que en el caso de 18 milímetros de arista dura algo más de 8 horas, como el más breve de los casos ALE.

- Velocidades

En la siguiente comparativa de velocidades se introducen los tres casos MIX, junto con la curva experimental y una representación de los cálculos ALE vistos anteriormente. Nuevamente las curvas 'B', 'C' y 'D' se corresponden con los datos 'combinados' y las curvas 'A' y 'E' a la curva experimental y a la muestra ALE', concretamente la curva 'A' es la experimental y la 'E' la curva 'ALE'.

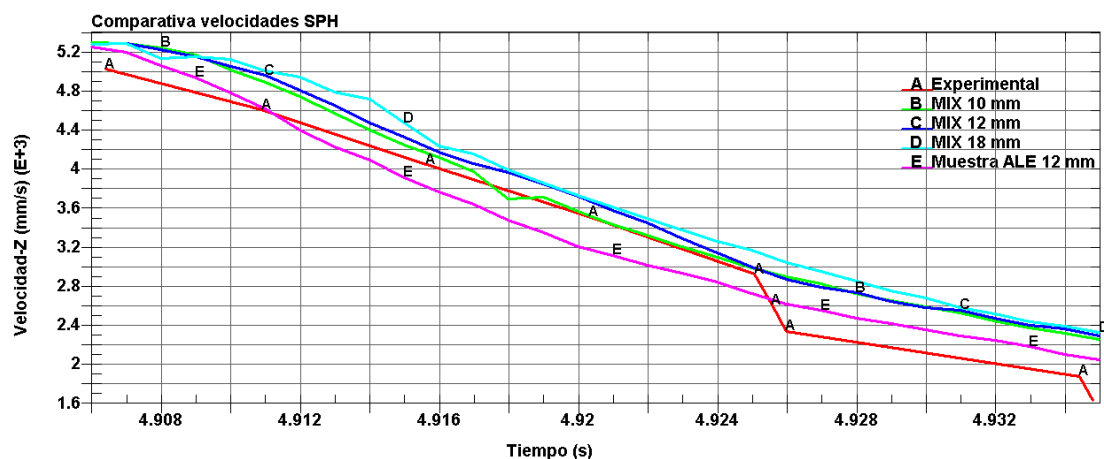


Figura 74 Comparativa de velocidades de los casos combinados y velocidad real

Observando la Figura 74, salvo alguna fluctuación, se ve en las curvas correspondientes a los casos 'combinados' un desarrollo muy ajustado a la curva experimental; también se observa una ligera divergencia con la curva ALE de muestra, aproximadamente de 0.5 m/s en el peor de los casos. Las fluctuaciones en las curvas se pueden achacar al registro de distintos contactos de partículas contra las zonas deformables de la cuña. Pese a todo,

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

dado que la curva experimental es orientativa debido a las dificultades que se comentaban en la página 50, no se puede descartar ninguna de las dos tecnologías (ALE, MIX) a partir del estudio de velocidades.

4.1.2.3 PRESIONES

Este punto se expone para dejar constancia del comportamiento del material rígido. En un ámbito cinético, el material rígido ideal de la cuña cumple de manera notable el comportamiento esperado; sin embargo, a la hora de predecir comportamientos dinámicos, la rigidez infinita del material provoca datos de presión y tensión erróneos. A continuación se mostrarán los distintos resultados de presiones obtenidos en los transductores de presión diseñados en la cuña.

Las presiones obtenidas mediante los distintos métodos FSI (ALE, SPH, combinación Lagrangiano-SPH) no consiguieron los resultados esperados. Los algoritmos que determinan la interacción de la cuña contra los elementos de fluido, tanto por acoplado como por contacto por *penalty* contra nodos másicos (partículas SPH), no provocan en los resultados un comportamiento perfecto.

Según el experimento se instalaron 12 transductores de presión de 19 mm de diámetro a lo largo de la superficie oblicua; éstos se encontraban equitativamente separados a lo largo de los aproximadamente 660 mm de arista, tal y como se observa en la Figura 75.

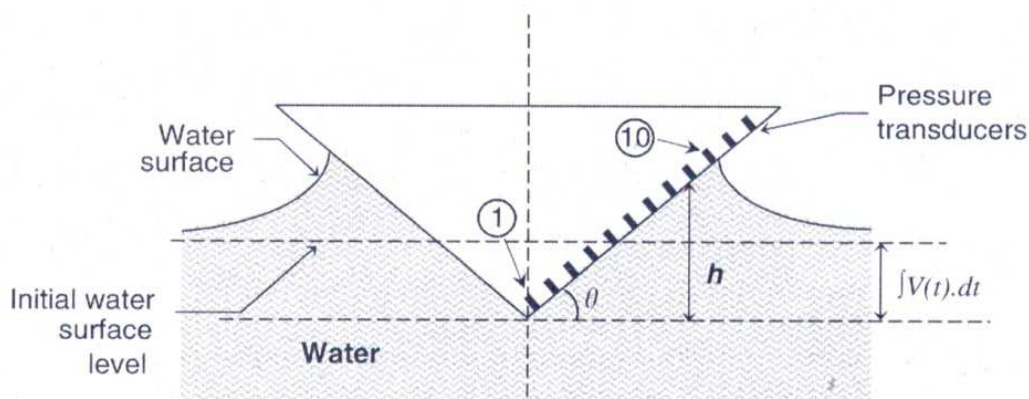


Figura 75 Croquis de la disposición de los transductores

Mediante estos transductores se consiguen dibujar una serie de histogramas de presión en la superficie de la cuña, provocados por el empuje del agua durante la inmersión. El resultado se engloba de la siguiente manera en el artículo, Figura 76:

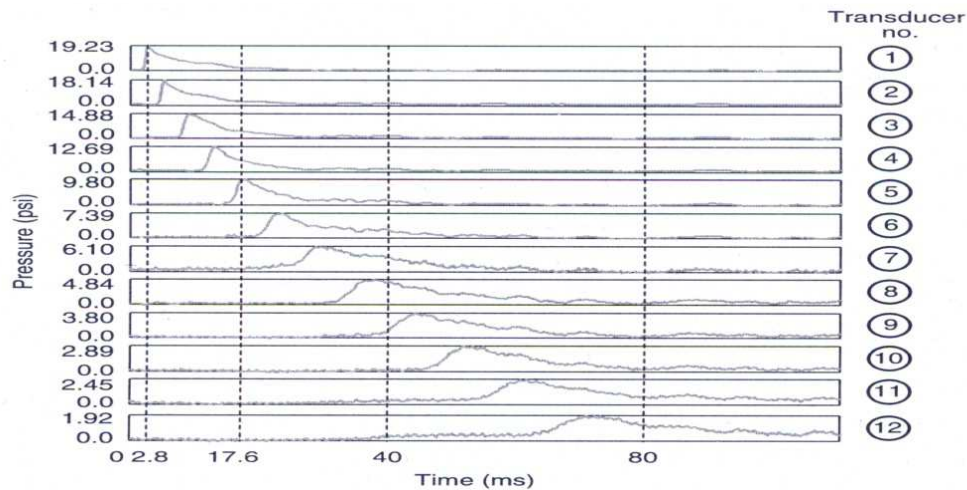


Figura 76 Histogramas de presión reales

Los ejes de los distintos histogramas están especificados en sistema imperial (presión: psi o *pounds per square inch* y tiempo: milisegundos) por lo que es necesario transformarlos, para ello se partirá de la relación $1\text{MPa}=145.04\text{psi}$ y $1\text{s}=1000\text{ms}$. A modo ilustrativo, si el pico de presión en el transductor 2 del ensayo es de 18.14 psi, su conversión a sistema internacional equivaldría a 0.125 Megapascasles.

De los 12 resultados que otorga el artículo del ensayo experimental se tomarán 3, cada uno representando uno de los 3 sectores figurados en los que se puede dividir la arista oblicua de la cuña. Estos 3 resultados son los correspondientes al transductor 2 (primer sector), transductor 6 (segundo sector) y transductor 10 (tercer sector). Los resultados mencionados se muestran como sigue:

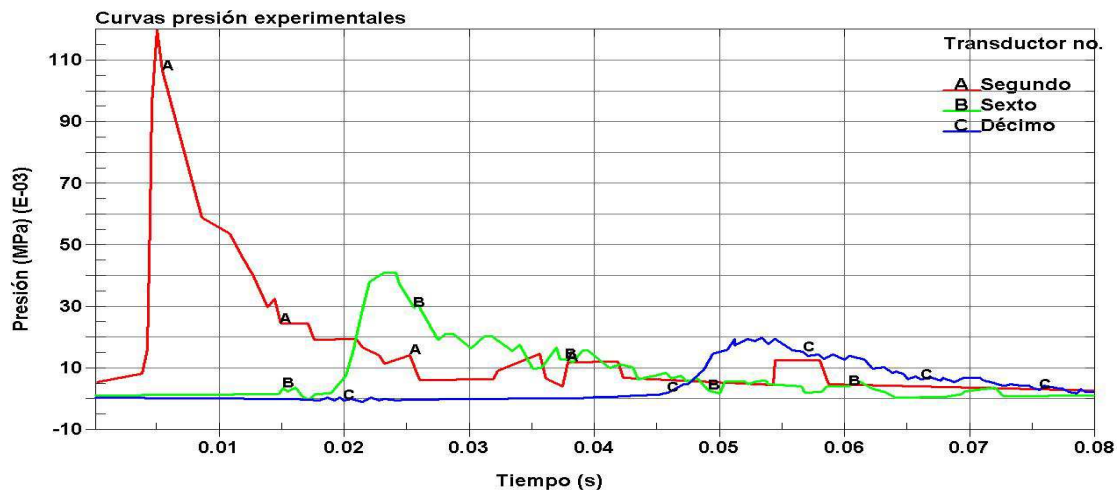


Figura 77 Histogramas de presión reales en LS-DYNA®

Estos resultados se compararán con los resultados tomados por los elementos que conforman la $PID=4$ que representan los transductores del ensayo. En concreto con los elementos medios de cada transductor, Figura 78, lo que garantizaría que sus nodos no se comparten con elementos de rigidez infinita.

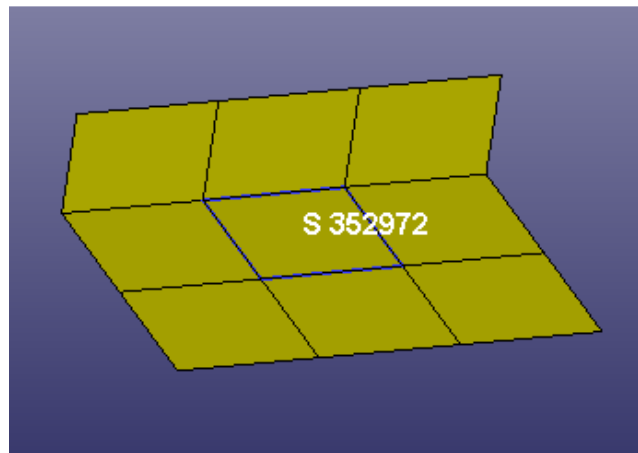


Figura 78 Elemento de medición en el transductor

1. ALE

Los casos de ALE muestran los resultados más cercanos a los valores reales pero sin responder a una precisión aceptable. Son erráticos y no mantienen la curva de presión como en el caso real.

a. ALE 10 mm:

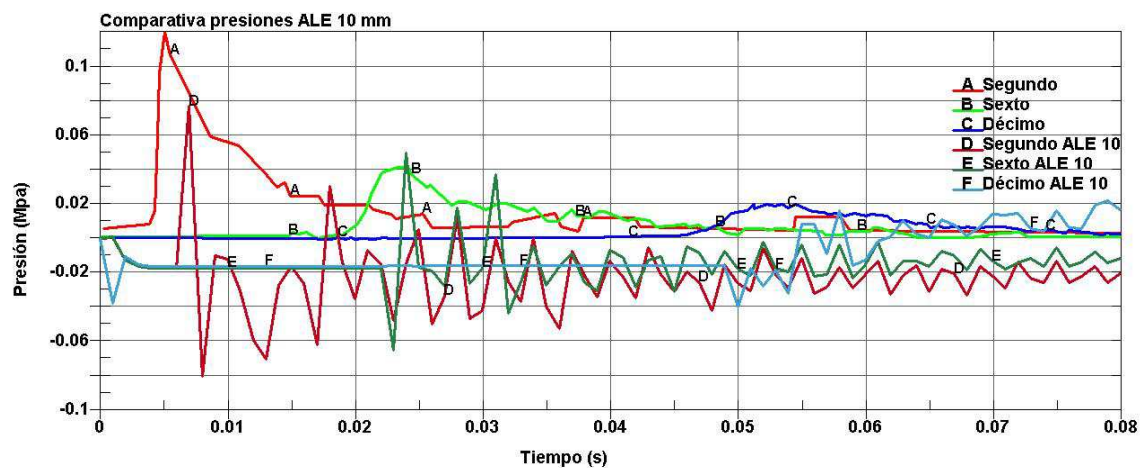


Figura 79 Comparativa ALE 10 mm y presiones reales

b. ALE 12 mm:

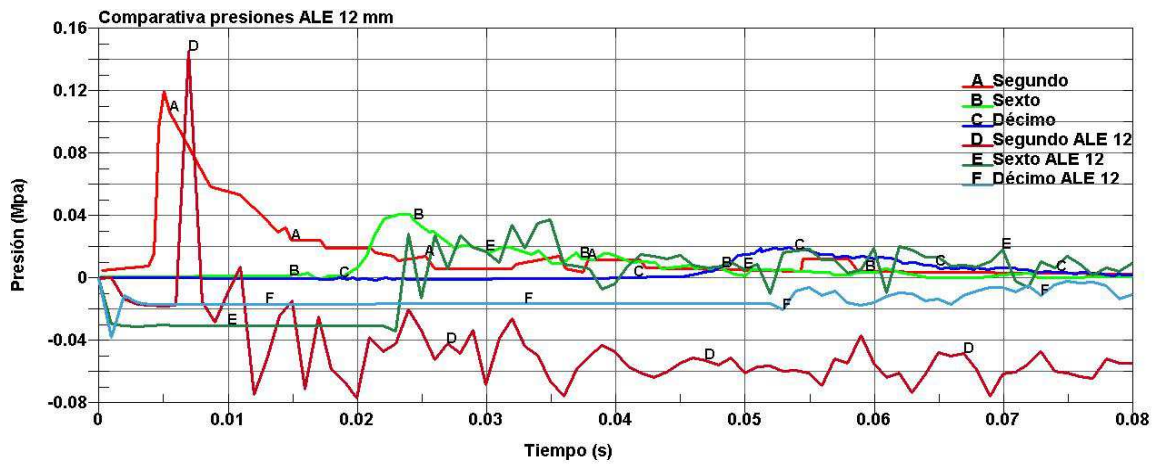


Figura 80 Comparativa ALE 12 mm y presiones reales

c. ALE 18 mm:

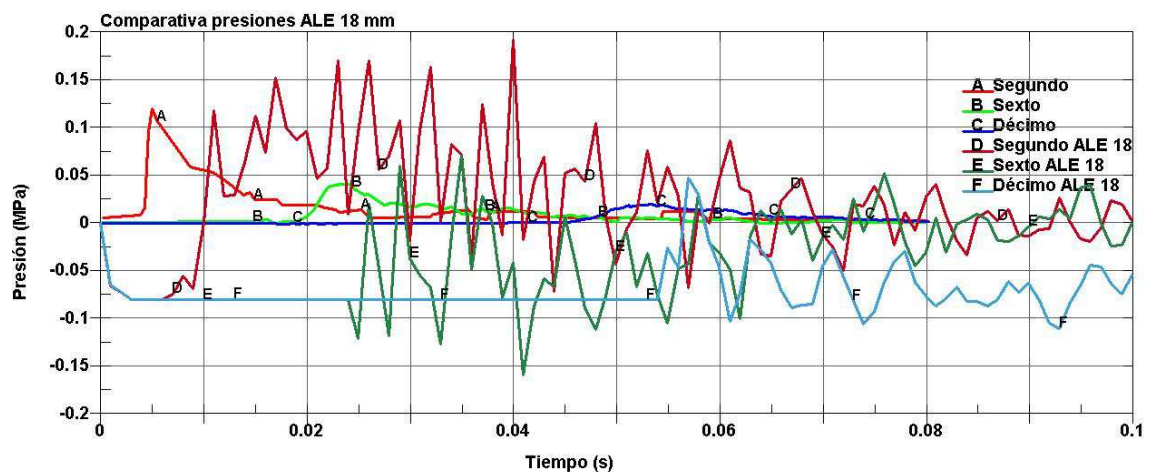


Figura 81 Comparativa ALE 18 mm y presiones reales

d. Caso FSI (ALE 18 mm):

Caso adicional que prueba la tarjeta *DATABASE_FSI_SENSOR, diseñada para registrar datos adicionales en elementos establecidos. Esta tarjeta permite registrar parámetros en elementos teóricamente rígidos que normalmente no lo permiten.

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

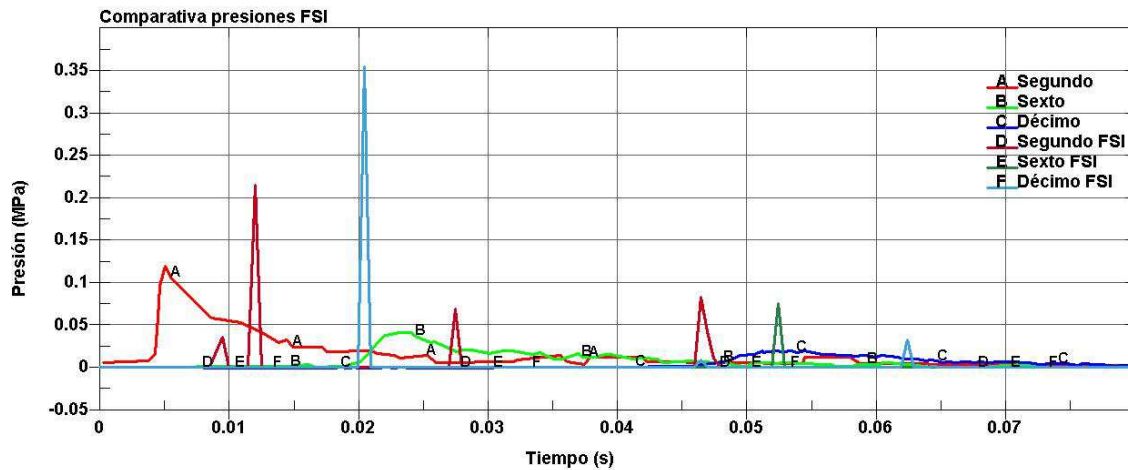


Figura 82 Comparativa presiones reales y FSI_SENSOR de los caso ALE

Como se puede observar, con este método tampoco se registran valores precisos aunque sí se aprecia menor distorsión en los resultados.

2. CASOS COMBINADOS

a. Caso combinado 10 mm:

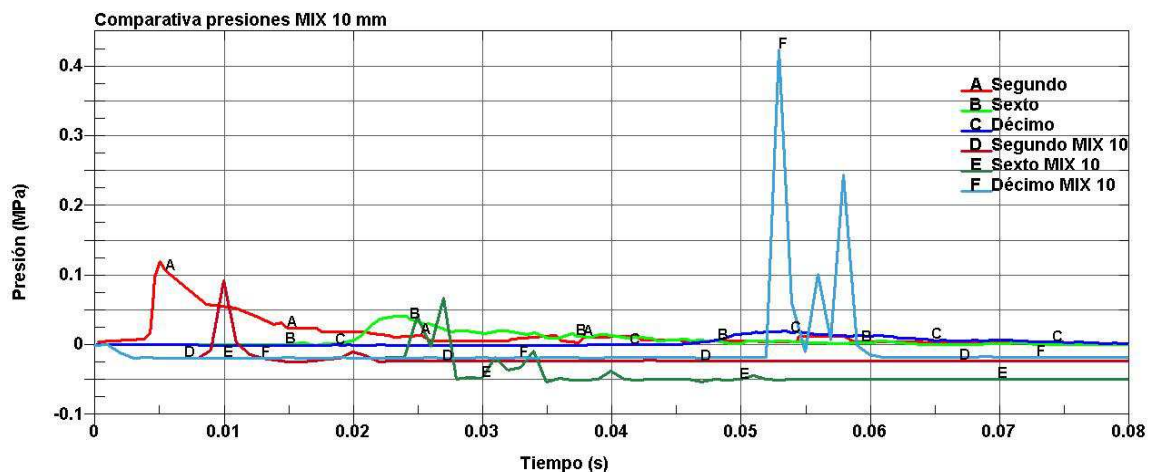


Figura 83 Comparativas de presiones reales y presiones del caso combinado de 10 mm

En esta comparativa se aprecian valores más cercanos a los valores reales salvo en el décimo transductor que la medida se dispara; por otro lado, se aprecia un pequeño desfase, de 5 ms aproximadamente, entre los picos de presión reales y calculados.

Hay que recordar que, para alcanzar este nivel de precisión, el modelo 'MIX 10 mm' tomó 42 horas y 44 minutos, tal y como se indica en la página 52. Conviniendo en que el estudio posterior del amerizaje se caracterizará por gráficas de índole cinética, tal y como se comprobará a partir del MIX 12 mm:

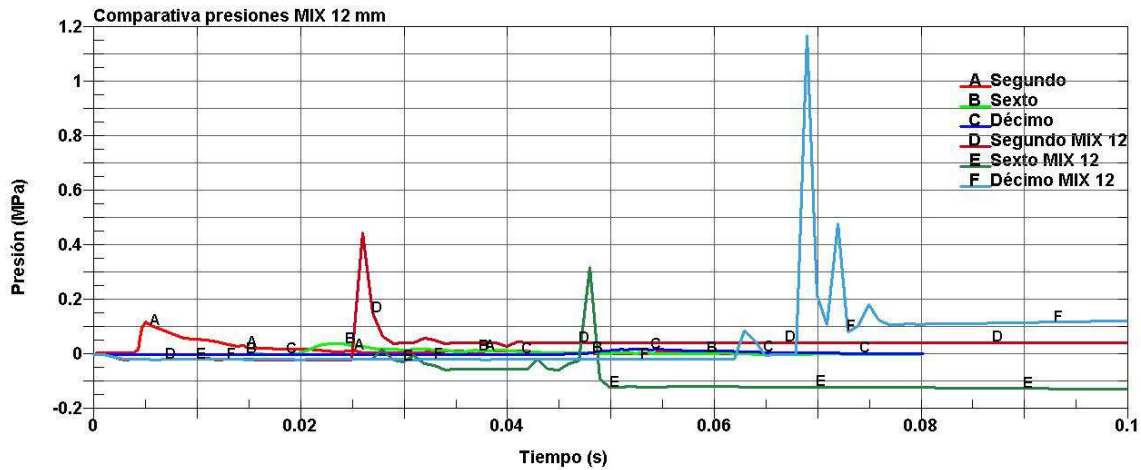


Figura 84 Comparativas de presiones reales y presiones del caso combinado de 12 mm

En este caso se pueden apreciar resultados muy por encima de los esperados, casi cuadruplicando las medidas del ensayo. Destaca la medida del décimo transductor, que es el que alcanza un pico mayor que el resto, cuando debiera tener una presión prácticamente nula; la curva que dibuja responde más a un impacto provocado por un cuerpo másico con elevada velocidad que a presión hidrodinámica.

b. Caso combinado 18 mm:

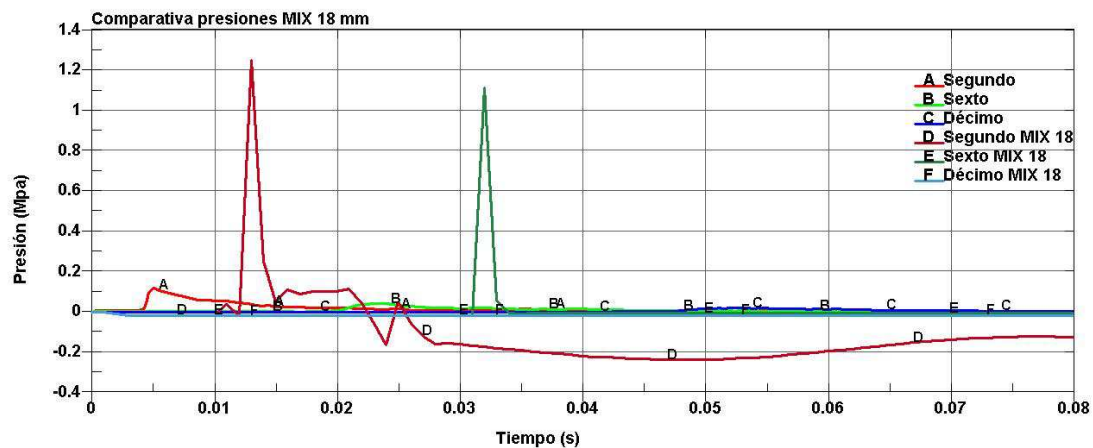


Figura 85 Comparativas de presiones reales y presiones del caso combinado de 18 mm

Una menor densidad de malla da lugar a pérdida de fiabilidad en los resultados en la mayor parte de los casos, pero en el caso 'MIX 18 mm' es más que evidente. Los valores registrados se disparan tomando picos de 10 veces el valor buscado además de mostrar un retardo de 10 milisegundos entre los valores máximos; esto es así en los dos primeros sectores de la arista de la cuña, en el último se comprueba que apenas se mide interacción.

c. Caso combinado mm versión b:

En esta versión se cambia a otro tipo de formulación de fluidos que rige el comportamiento de las partículas SPH (FORM=6, en la tarjeta *CONTROL_SPH), en lugar de la formulación genérica (FORM=5) que el LS-DYNA® dispone para modelar fluidos.

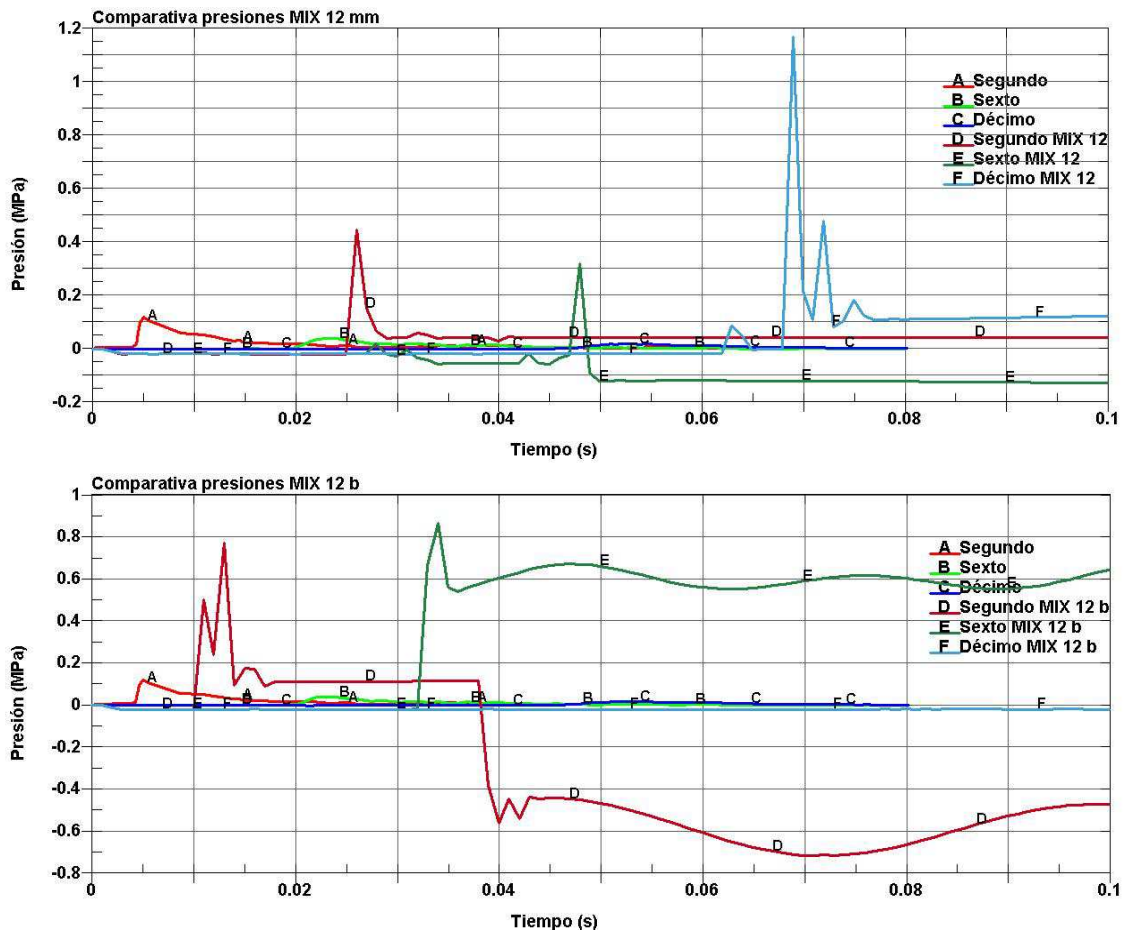


Figura 86 Comparativas de presiones según en la formulación SPH empleada

Los resultados de este caso se asemejan más a los del caso 'MIX 18 mm' que a 'MIX 12 mm': valores mucho mayores de lo esperado y un desfase de aproximadamente 10 milisegundos. Hay que destacar el comportamiento en torno a los 35 milisegundos, se ve una ondulación en la medida que puede ser causada por la nueva formulación (FORM=6) que se ha implementado.

d. Caso combinado 18 mm versión c:

Esta versión se cambia el contacto implantado, *AUTOMATIC NODES TO SURFACE SMOOTH, por el contacto *CONTACT NODES TO SURFACE para comprobar cómo cambia la presión registrada por los elementos en función del tratamiento de la interacción entre ellos y si da lugar a presiones más próximas a los valores reales.

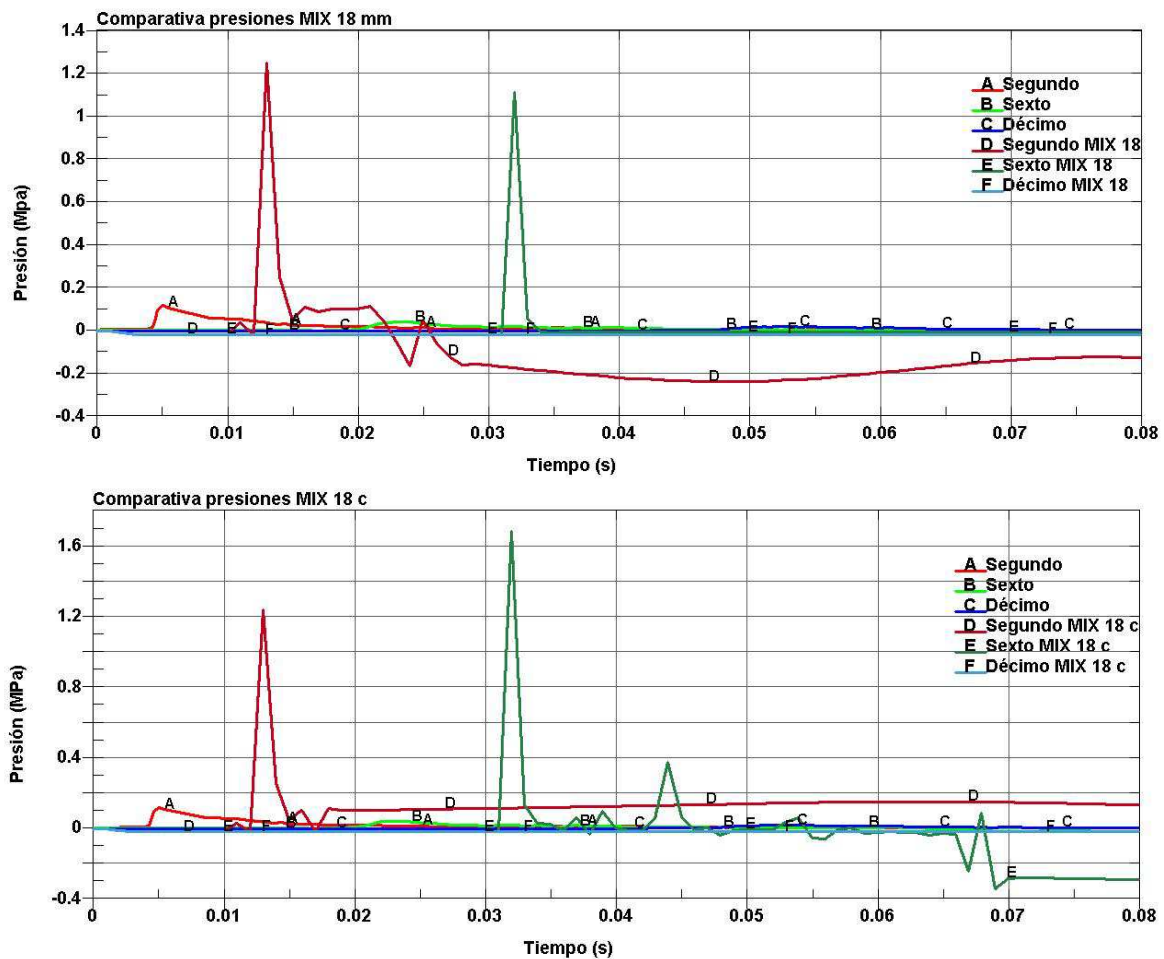


Figura 87 Comparativa de presiones según el tipo de contacto

Se comprueba que los resultados apenas cambian y se puede entender que para estos casos el tipo de contacto no es crítico para alcanzar los resultados esperados.

4.1.3 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha realizado una puesta de largo de los dos principales medios para el estudio de fluidos, la tecnología ALE y la tecnología SPH, esta última con la combinación entre Lagrangiano y SPH.

A tenor de los resultados es difícilmente descartable una de las dos tecnologías. Se puede aceptar el hecho de que, cuando las circunstancias así lo exijan, para un estudio con detalle, sin atender al esfuerzo computacional, es recomendable diseñar un cálculo con tecnología ALE. El grado de precisión del cálculo del desplazamiento y del campo de velocidades es ligeramente mayor con un menor coste computacional. Tal y como refleja la siguiente tabla:

Tabla 2 COMPARATIVA DE TIEMPO Y PRECISIÓN

	ALE 10 mm	MIX 10 mm
Tiempo cálculo	31 horas y 28 minutos	42 horas y 44 minutos
Error desplazamientos	2.5 %	5 %
Error velocidades	5.7 %	15.6 %

Si, por el contrario, se atiende a aspectos prácticos, o se busca realizar un estudio de aproximación la tecnología SPH nos permite un comportamiento fluido bastante aceptable con una implementación mucho más sencilla que la tecnología ALE. La definición de las condiciones de contorno mediante nodos en lugar de segmentos y, especialmente, la robustez del contacto SPH-Shell frente al acoplado del ALE, que evita especiales cuidados a la hora de dirigir el acoplado en superficies angulosas o curvas, supone un ahorro de esfuerzo por parte del investigador que apenas repercute en la calidad de los resultados.

Cabe indicar que estas conclusiones son referentes al caso de la cuña, el cual supone predominio de las fuerzas dinámicas sobre las viscosas. Es relevante ver el ajuste del modelo para el siguiente caso, el del amerizaje, en el cual la fuerza viscosa provocada por el deslizamiento del fuselaje sobre el agua alcanza una importancia mayor.

5 MODELO DE AMERIZAJE

5.1 DITCHING

Se produce *ditching* cuando una aeronave, no preparada para tal efecto, se posa de manera controlada sobre una extensión de agua, de tal modo que, debido a la profundidad de ésta, los ocupantes de la aeronave se vean obligados a evacuarla durante el proceso de hundimiento. Para un suceso así es importante garantizar, para un rango factible de velocidades, la integridad de la estructura de tal forma que el pasaje tenga opciones de realizar una evacuación aceptable en tiempo y condiciones.

De cara al presente proyecto el caso de ditching es interesante debido a su desarrollo. Se espera que una maqueta de avión entre con una componente de velocidad tangencial mucho mayor a su componente normal. Este caso permitirá estudiar cómo el LS-DYNA® simula el comportamiento viscoso de los fluidos, en concreto con la tecnología SPH. La naturaleza discontinua del SPH puede ser crucial a la hora de simular el desarrollo de una superficie continua sobre otra. Este aspecto no era determinante en el ensayo patrón ya que, una vez iniciado el contacto, las partículas SPH no dejaban de contactar con la cuña y ésta actuaba contra toda la región SPH, sin embargo, en el caso de *ditching* sólo actuará contra las partículas que conforman el primer nivel.

5.1.1 MODELO EN ELEMENTOS FINITOS

Según se relata en el modelo, el desarrollo de los test permite aplicar la hipótesis de simetría por lo cual se modelará la mitad de toda la geometría. Como se ha explicado anteriormente el modelo se va a desarrollar en SPH lo que nos dejará dos geometrías principales: el fluido y la aeronave. Las unidades a emplear son las correspondientes a un modelo de baja velocidad y se encuentran agrupadas en la Tabla 1 UNIDADES, sita en la página 22.

Se ha buscado diseñar el modelo lo más fiel posible al modelo 5.2 del artículo 'CASO 2: CRASH ON WATER: **A MULTY-PHYSICS PROBLEM**'. Siendo esto así, será posible establecer una comparativa efectiva con los resultados del modelo de origen, diseñado en PAM-CRASH®, viendo la precisión que aporta LS-DYNA.

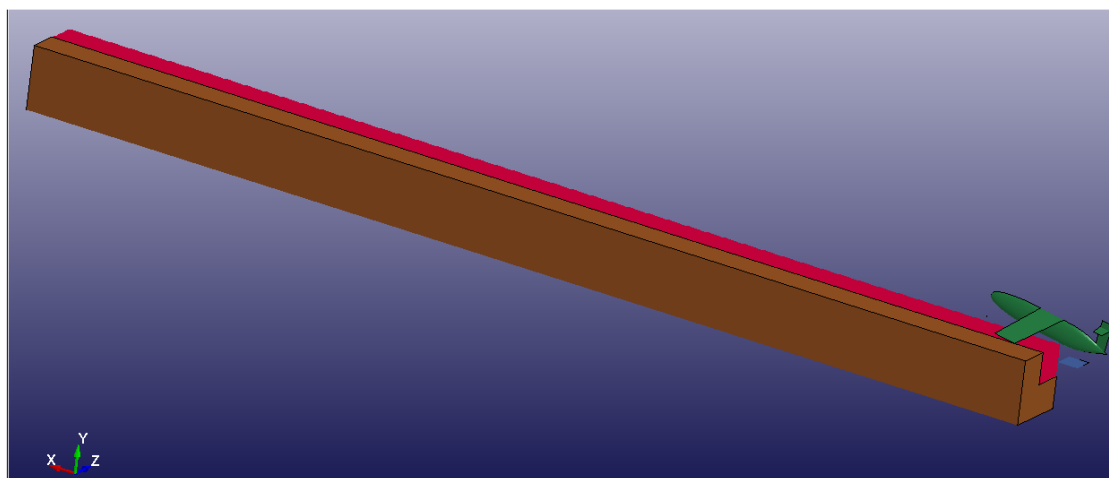


Figura 88 Modelo de ditching

5.1.1.1 FLUIDO

Se compone de dos *part*, la región de impacto (*pid*=6) y la región circundante (*pid*=5) a la región de impacto. Su anchura y profundidad son 600 mm, a imitación del modelo PAM-CRASH®, su longitud es de 10100 mm, una longitud que garantiza que en condiciones normales el avión se deslizará y detendrá dentro del canal.

- La región de impacto es la banda roja que se observa en la Figura 88. Se encuentra formada íntegramente por partículas SPH separadas una distancia de 25 mm, tanto en a lo largo del X como a lo largo del eje Z.
- La región circundante es la región ocre con perfil 'L' que rodea la región de impacto. Ha sido dibujada mediante elementos lagrangianos, propagando la malla desde la zona de contacto con el SPH hacia las teóricas paredes del canal.

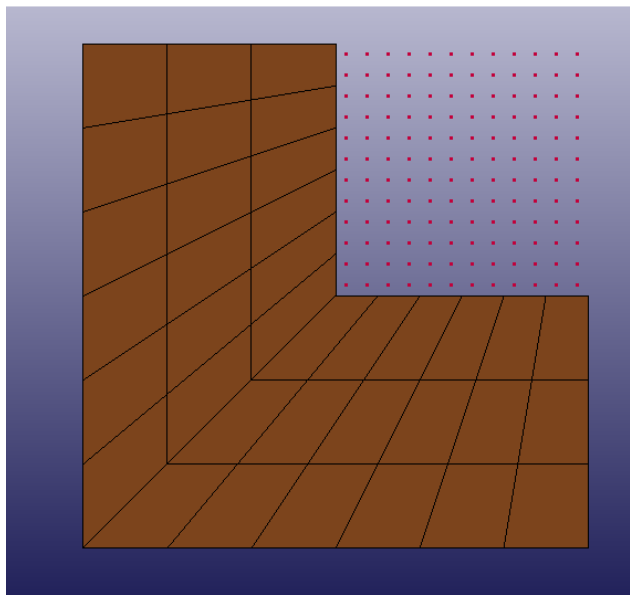


Figura 89 Sección del fluido en el modelo

Ambas partes comparten los mismos parámetros en las tarjetas **MAT* (**MAT_NULL*) y **EOS* (**EOS_GRUNEISEN*) que los modelos de la cuña, página 27; por otro lado, cada una posee una tarjeta *SECTION* propia, esto es, la tarjeta correspondiente a SPH para la *part* 6 y la tarjeta *SECTION_SOLID*, en modo lagrangiano, para la *part* 5.

5.1.1.2 AERONAVE

El modelo de maqueta de aeronave se compone del cuerpo de la aeronave (*pid*=3) y de una herramienta de medición, *pid*=7, cuya función es la de permitir la medida del cabeceo del avión.

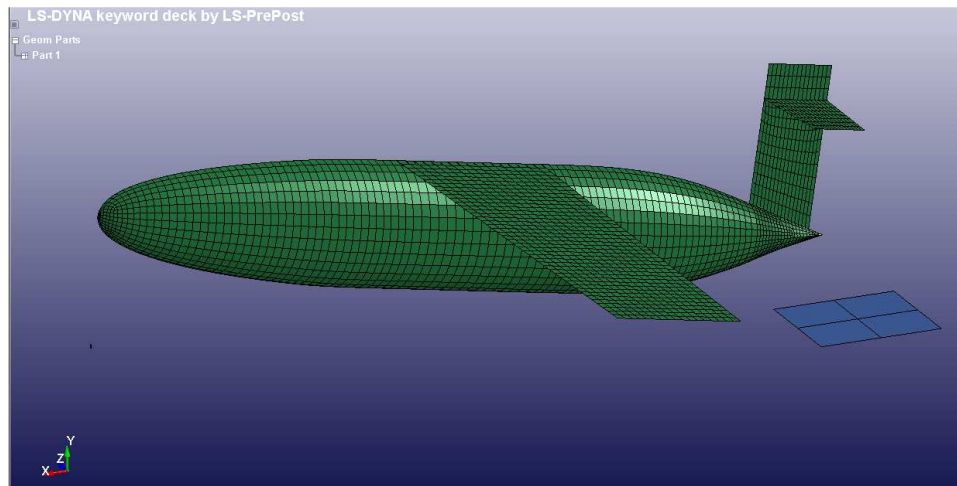


Figura 90 Aeronave y herramienta de medición

- El avión está compuesto de una piel formada por *shells* rígidas, que mantienen constantes las distancias respecto a sus nodos de referencia. En esta ocasión no se tienen referencias a la presión que soportaría la panza del avión, por lo que se evita la disposición de partículas deformables que exigen más esfuerzo de computación.
- La herramienta de medición consiste en un útil virtual que es solidario al avión en los desplazamientos lineales pero que mantiene siempre la posición horizontal, con lo que, de inicio dibuja junto con el eje de rotación del cuerpo del avión 10° , Figura 91. En este caso también se emplea tarjeta de material rígido que permite mantener la posición horizontal durante todo el proceso.

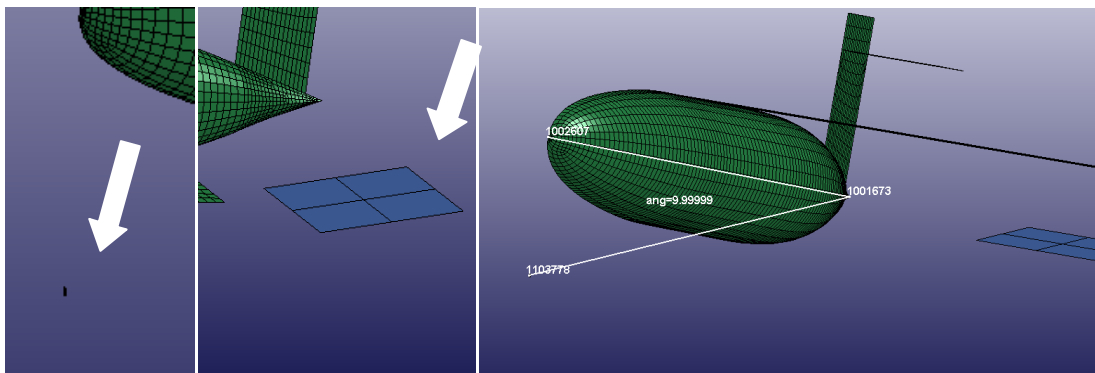


Figura 91 Croquis de medición de cabeceo

Como ya se ha comentado ambos bloques tienen material rígido ideal y se definen como *shells* de la misma forma que se definió anteriormente la cuña en el ensayo de inmersión, página 30.

INTERACCIÓN FSI (*CONTACT)

Este aspecto del diseño es esencial ya que de él depende la fiabilidad del modelo. Al ser interacción entre *shell* lagrangianas y partículas SPH, el medio para hacerles interactuar es mediante tarjetas de contacto.

```

*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_MPP_ID
$#      cid                                     title
1
$#  ignore      bucket      lcbucket      ns2track      inititer      parmax      unused      cparm8
0          200          0          3          2      1.000500          0          0
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
6          3          3          3          0          0          1          0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
0.300000      0.100000      0.050000      0.010000      0.010000          0      0.050000      1.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
1.000000      1.000000          0.000          0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
$#      soft      sofsc1      lcidab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq
1      0.100000          0      1.025000      2.000000          2          0          1
$#      penmax      thkopt      shlthk      snlog      isym      i2d3d      sldthk      sldstf
0.000          0          0          0          0          0          0.000          0.000
$#      igap      ignore      dprfac      dtstif      unused      unused      flangl
1          0          0.000          0.000          0          0          0.000

```

Figura 92 Tarjeta de contacto entre fluido y fuselaje

Se empleará la tarjeta `*CONTACT_NODE_TO_SURFACE` para ligar los nodos SPH con la superficie de *shells* que posee el avión. Se definen para el contacto los elementos de la panza del avión y toda la región SPH para garantizar que las partículas SPH actúan convenientemente.

Los aspectos a destacar de este contacto son los que se recogen en la siguiente ecuación:

$$\mu_c = FD + (FS - FD)e^{-DC \cdot |v_{rel}|}$$

Ecuación 9

Donde FS es coeficiente estático de fricción, FD coeficiente dinámico de fricción y DC es el coeficiente de pérdida. Más adelante, en los resultados, se podrá comprobar las diferencias que provocan estos parámetros o no y las diferencias con el modelo de referencia.

5.1.2 ESTUDIO DE RESULTADOS

Nuevamente se va a proceder al análisis de los resultados obtenidos a través del cálculo del amerizaje. Se vuelve a emplear una serie de resultados de un modelo real, que se dan por patrón de medida, para cotejar con los de los cálculos, para definir el grado de fiabilidad del cálculo.

En este caso se tiene una única tecnología FSI aplicada a los modelos. La tecnología a emplear es SPH, que coincide con la que se emplea en el artículo *CRASH ON WATER: A MULTI-PHYSICS PROBLEM* mediante el código PAM-CRASH®.

Se vuelve a atender a los resultados cinéticos (cabeceo, velocidad) para cotejar los modelos. La ausencia de otros datos, así como de un registro de tiempos de cálculo nos impide comparar más allá de estos aspectos.

5.1.2.1 EXPOSICIÓN DE RESULTADOS/COMPARATIVAS

A continuación se expondrán los resultados obtenidos por las distintas versiones del cálculo. Se mostrarán resultados sobre la deceleración del avión en comparativa con la curva de resultados reales del artículo. Aparte se comentará el cabeceo producido por el avión durante su deslizamiento sobre el fluido.

COMPARATIVA DE VELOCIDAD

Gráfica de velocidad del artículo, Figura 15 de dicho documento:

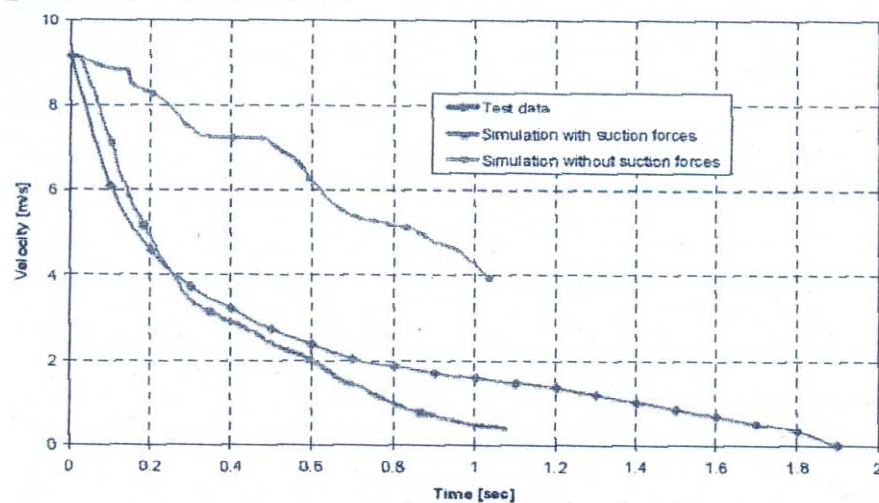


Figura 93 Histograma de velocidad según el artículo [13].

En esta gráfica se ven tres series distintas, como información se procede a identificar cada una:

- Curva real: Es la más larga de las tres ya que alcanza los 1.9 segundos. Se observa que la curva decae rápidamente para luego suavizar su pendiente cuando su velocidad es baja.
- Simulación sin fuerzas de succión: Es la curva errática de valores más altos. Pese a que se observan oscilaciones se puede definir una pendiente casi constante en la pérdida de velocidad.
- Simulación con fuerzas de succión: Es la curva que ronda la curva real, presenta un desarrollo semejante a la curva real salvo a partir de los 0.6 segundos donde pierde velocidad más acusadamente.

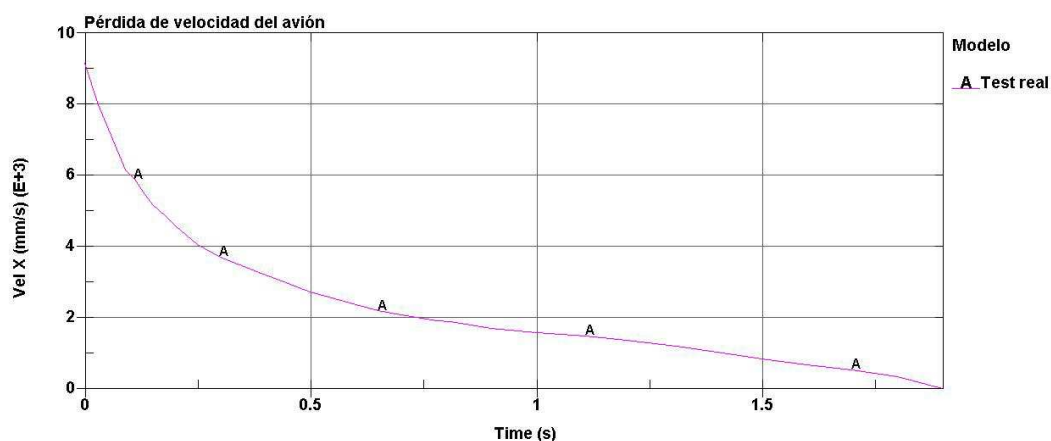


Figura 94 Histograma de velocidad traducido a LS-DYNA®

El objetivo en esta parte del proyecto es aproximarse, de la forma más precisa posible, a la curva real que se presenta. También se busca identificar los parámetros en LS-DYNA® que permitan desarrollar una interacción con el fluido con y sin fuerzas viscosas. Para ello se

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

atenderá a los principales parámetros de fricción del contacto como más adelante se mostrará.

Se relatarán los casos de manera cronológica, saltando a los casos críticos del estudio.

· MODELO AVIÓN 14

Primer modelo de los modelos relevantes.

Tiempo de cálculo: 6 horas 40 minutos en dos procesadores.

Contacto simple, sin parámetros de fricción salvo un mínimo coeficiente ($vdc=1\%$) de 'damping' para evitar resonancia del avión, infinitamente rígido.

```
*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_MPP_ID
$#      cid                                     title
$#      1
$# ignore      bucket      lcbucket      ns2track      inititer      parmax      unused      cparm8
$#      0          200          0          3          2      1.000500          0          0
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
$#      6          0          0          0          0          0          1          0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      pshk      bt      dt
$#      0.000      0.000      0.000      0.000      0.010000      0.050000      1.0000E+20
$#      fs      sfm      sst      mst      sfmt      sfmt      fsf      vsf
$#      1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000      1.000000      1.000000
```

Figura 95 Detalle de los parámetros de contacto

El resultado: La velocidad del avión apenas decae mientras el avión se desliza por la superficie fluida.

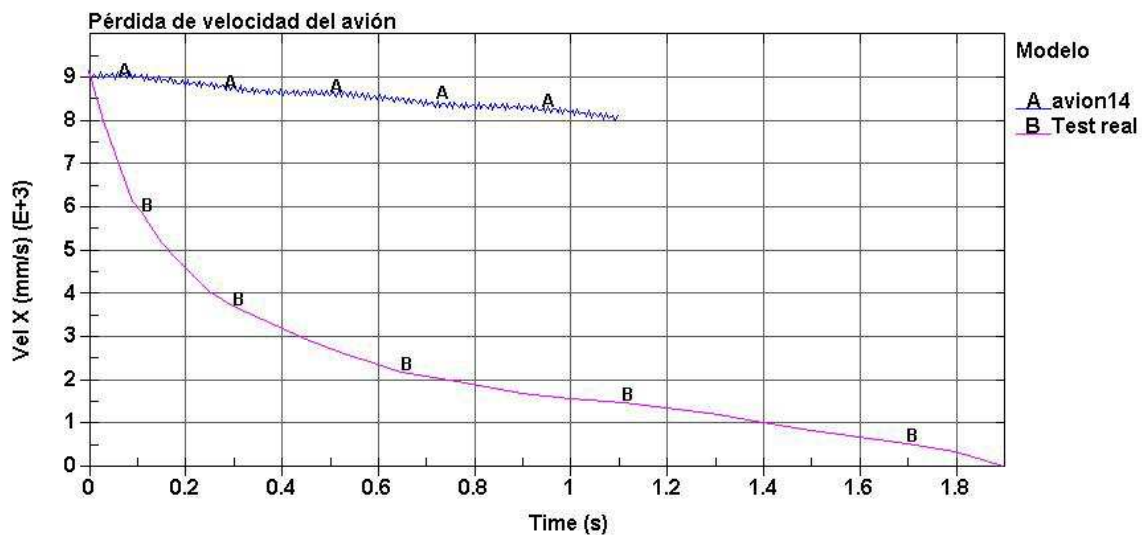


Figura 96 Comparativa velocidad real y caso 'avion14'

Esto da a entender que es necesario definir algún tipo de coeficiente de rozamiento para que la viscosidad del agua retenga al sólido y absorba parte de su energía cinética.

· MODELO AVIÓN 15

Tiempo de cálculo: 6 horas 44 minutos en dos procesadores.

Este modelo hereda el diseño del ‘avión 14’ y añade coeficientes de rozamiento genéricos.

```
*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_MPP_ID
$#      cid                                     title
$#      1
$# ignore bucket lcbucket ns2track inititer parmax unused cparm8
$#      0      200      0      3      2 1.000500      0      0
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
$#      0      0      0      0      0      0      1      0
$# fs fd dc vc vdc shk bt dt
$# 0.300000 0.100000 0.050000 0.010000 0.010000 0 0.050000 1.0000E+20
$# fs sfm sst mst ssc sfmt fsf vsf
$# 1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
```

Figura 97 Detalle de los parámetros de contacto

Resultado: Se confirma que el empleo de coeficientes de fricción permite actuar a la viscosidad del fluido sobre el sólido. Se observa una deceleración mayor que en el caso ‘avión 14’.

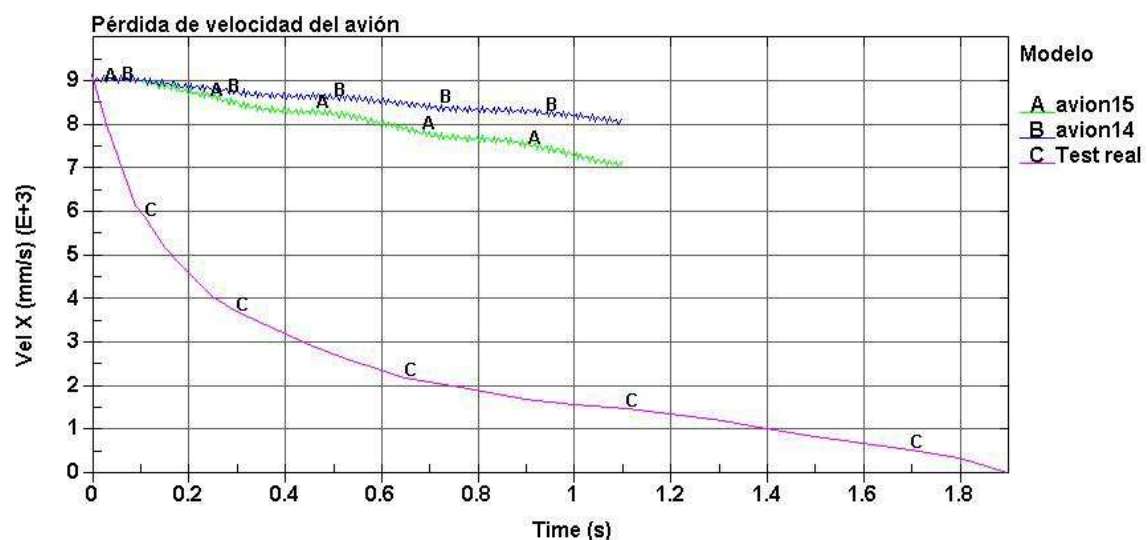


Figura 98 Comparativa con el caso ‘avion15’

El siguiente paso es conocer cómo afecta a la deceleración del cuerpo los distintos coeficientes de fricción; según la teoría el principal agente en la detención del avión será el coeficiente de fricción dinámica, asociado a la velocidad relativa entre entidades en contacto.

· MODELO AVIÓN 15b:

Tiempo de cálculo: 6 horas 47 minutos en dos procesadores.

Caso con valores de fricción extremos (fs=fd=vc=100%) para delimitar, junto con ‘avión 14’, la imagen de la velocidad como función de los coeficientes de fricción.

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

```

*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_MPP_ID
$#      cid                                     title
      1
$# ignore bucket lcbucket ns2track inititer parmax unused cparm8
      0      200      0      3      2 1.000500      0      0
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      0      0      3      3      0      0      1      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      shk      bt      dt
1.000000 1.000000 0.050000 1.000000 0.010000 0 0.050000 1.0000E+20
$#      fsm      sst      mst      fsc      sfmt      fsf      vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000

```

Figura 99 Detalle de los parámetros de contacto

Resultado: Se alcanza un descenso muy acusado de velocidad, la curva (roja) presenta una pendiente semejante a la curva real pero sólo en el intervalo entre 0.2 y 0.3 segundos; en 0.3 segundos, el gradiente de velocidad real disminuye cuando en el caso extremo se mantiene hasta una velocidad relativa casi nula.

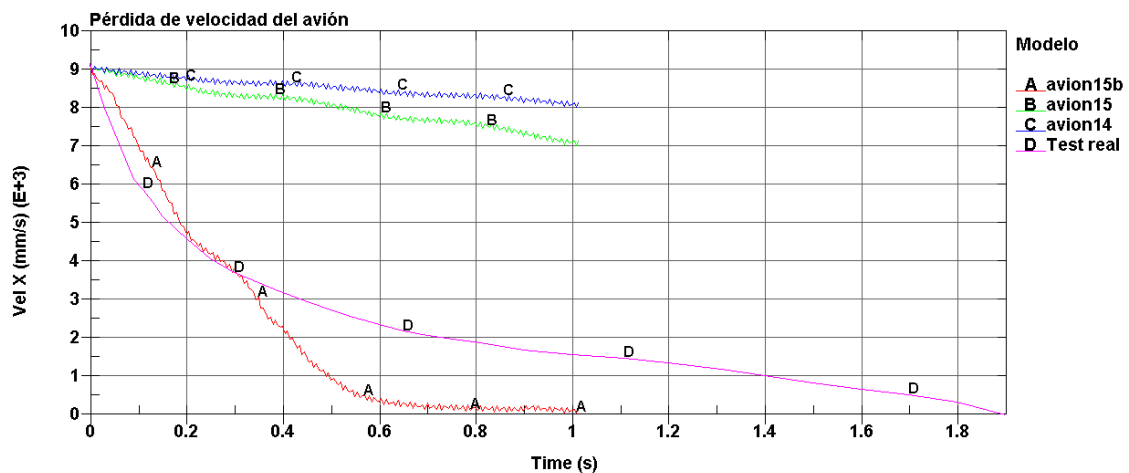


Figura 100 Comparativa con el caso 'avion15b'

Es necesario conocer cómo afectan por separado los coeficientes para intentar ajustar la curva de deceleración al comportamiento real. Hay que buscar si se puede obtener un comportamiento, mediante el cual, el efecto de disipación disminuya a la par que se reduce la velocidad, justo lo que ocurre en la realidad con la fricción dinámica.

MODELO AVIÓN 15b_001:

Tiempo de cálculo: Acabó súbitamente a las 5h 16 segundos, por el intervalo de escritura de resultados 'd3plot' se supone una duración de 6 horas 35 minutos en dos procesadores.

En este caso se mantiene al 100% el parámetro VC, el coeficiente de fricción viscosa, mientras que se anulan los coeficientes FS y FD.

```
*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_MPP_ID
$#      cid                                     title
1
$# ignore bucket lcbucket ns2track inititer parmax unused cparm8
0      200      0      3      2 1.000500      0      0
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
6      3      3      3      0      0      1      0
$# fs fd dc vc vdc pchck bt dt
0.000 0.000 0.050000 1.000000 0.010000 0.050000 1.0000E+20
$# sfa sfm sst mst sfsc sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
```

Figura 101 Detalle de los parámetros de contacto

Resultado: La curva de deceleración es, a todas luces, casi idéntica al caso ‘avión 14’ y se superpone a la del caso citado. Aparte de eso se ve el progreso logrado por el caso en comparación con el caso ‘avión 14’ que alcanzó el hito final.

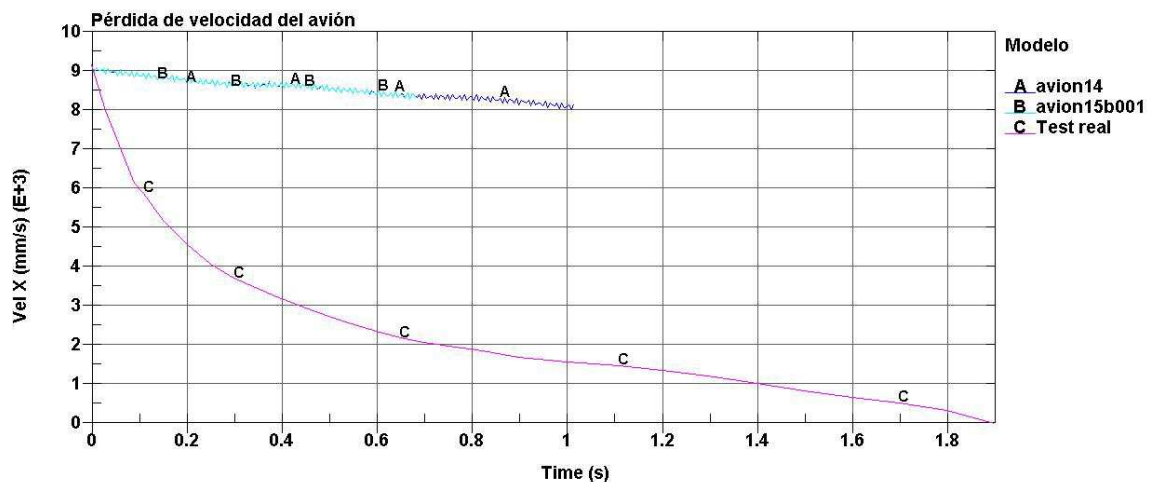


Figura 102 Comparativa con el caso ‘avion15b001’

El factor VC, aunque hace referencia a la viscosidad del medio, sólo es aplicable a sólidos elásticos en contacto, modelizando su resistencia a fluir, en un medio líquido (*MAT_NULL) este factor deja de tener sentido tal y como demuestra este último caso.

· **MODELO AVIÓN 15b_100:**

Tiempo de cálculo: 9 horas 19 minutos en dos procesadores.

En este caso se mantiene al 100% el parámetro FS, el coeficiente de fricción estática, mientras que se anulan los coeficientes VC y FD.

```
*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_MPP_ID
$#      cid                                     title
1
$# ignore bucket lcbucket ns2track inititer parmax unused cparm8
0      200      0      3      2 1.000500      0      0
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
6      3      3      3      0      0      1      0
$# fs fd dc vc vdc pchck bt dt
1.000000 0.000 0.050000 0.000 0.010000 0.050000 1.0000E+20
$# sfa sfm sst mst sfsc sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
```

Figura 103 Detalle de los parámetros de contacto

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

Resultado: Como era de esperar la aportación de la fricción estática en un caso como éste es mínima, de tal modo, la curva de deceleración sigue el mismo desarrollo que en el caso sin fricciones.

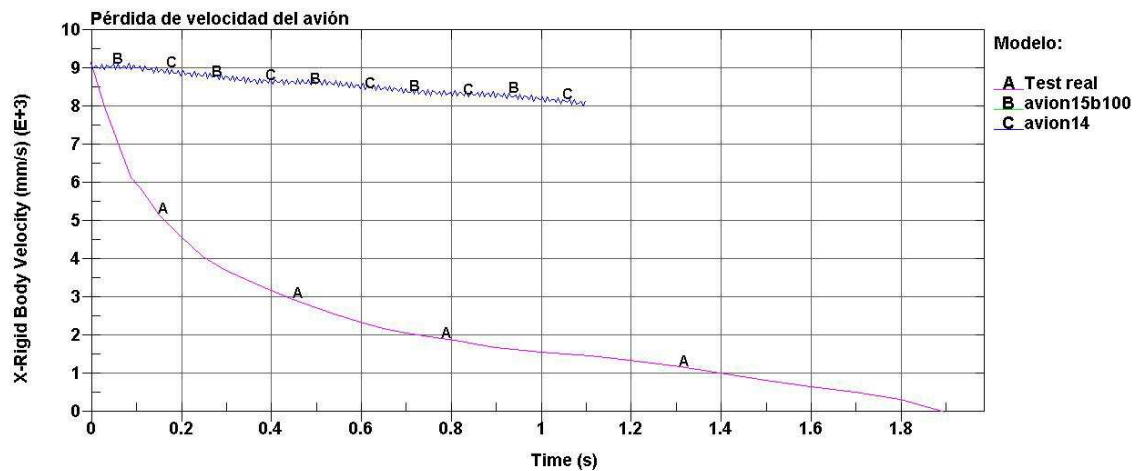


Figura 104 Comparativa con el caso 'avion15b100'

El factor FS, apenas tiene relevancia en un caso de contacto contra un fluido, no se puede considerar que tenga un mínimo de aportación en la deceleración del avión al amerizar.

Por eliminación se atribuye al factor FD, fricción dinámica, el peso en el freno del avión en su deslizamiento sobre las partículas SPH. Por ello se desarrollan a continuación dos casos paralelos, 'avión 15b_010' y 'avión 15b_0.60', uno con el factor al 100% y el otro al 60%, para estudiar cómo éste factor transforma la curva según sea su valor.

· MODELOS AVIÓN 15b_010 Y AVIÓN15B_0.60:

Se denominará al caso con FD=1 'caso A' y al caso con FD=0.6 'caso B' por comodidad en la exposición.

Tiempo de cálculo: El caso A supuso 9 horas y 26 minutos mientras que el caso B supuso 9 horas y 33 minutos, ambos en dos procesadores sin ejecutarse a la vez. El incremento de 6 a 9 horas de los últimos casos se pueden achacar a rendimientos externos a este estudio ejecutados por el equipo del departamento.

Resultados: Hasta el momento en el que el avión llega a una velocidad que se puede considerar nula, el factor FD imprime una deceleración al avión constante, independientemente de la velocidad relativa entre entidades, lo que visualmente indica que FD define la pendiente de la curva de deceleración pero no su curvatura.

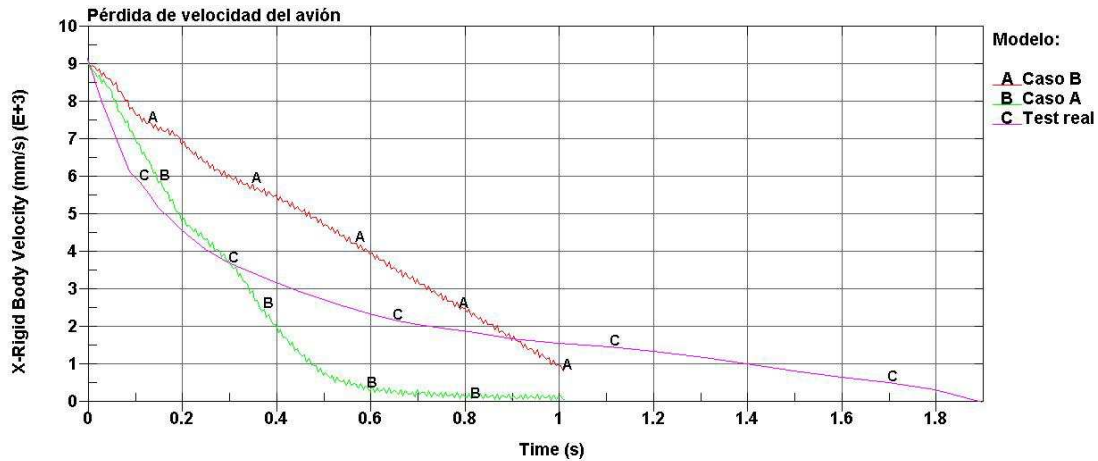


Figura 105 Comparativa entre el caso real y los casos 'A' y 'B'

Se llega a la conclusión de que el factor FD es crítico en este estudio ya que es el principal agente de frenado del avión. También se constata que por sí solo no es capaz de simular correctamente la deceleración real ya que es independiente de la velocidad relativa avión-fluido. Por último cabe indicar la importancia de la malla, nuevamente; se observa un retardo (máximo 0.06 segundos para 6m/s) en la deceleración, este retardo no se puede reducir ajustando el contacto y es debido a tamaño de la discontinuidad entre partículas SPH y la falta de respuesta del contacto, lo cual es provocado por la falta de respuesta en dichas discontinuidades.

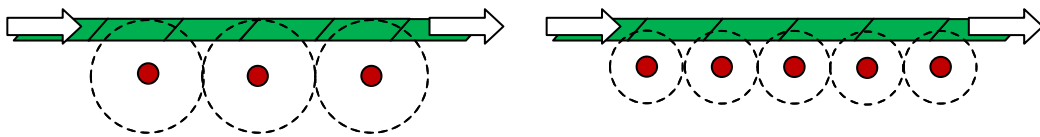


Figura 106 Croquis de contacto y densidad de partículas

Ya se han estudiado los principales factores de la Ecuación 9 junto con un coeficiente (VC) de viscosidad de la región de contacto. Queda por estudiar el exponente DC, que permite hacer, al coeficiente global μ , dependiente de la velocidad relativa de las entidades en contacto.

· **MODELOS AVIÓN DC 0.1, DC6e-4 y DC3e-4:**

Se denominará al caso con DC=0.1 'caso C', al caso con DC=6e-4 'caso D' y al caso con DC=3e-4 'caso E' siguiendo con la denominación anterior.

Tiempo de cálculo: El caso C duró 6 horas y 34 minutos, el caso D, 6 horas y 32 minutos, el caso E, 8 horas y 10 minutos por paralelizado de tareas en el servidor.

DC será un valor constante, único para la Ecuación 9 durante el desarrollo del caso, por lo que hay que especificar qué valor será el que defina mejor la deceleración del cuerpo rígido.

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

Estudiando la Ecuación 9 de manera que μ sea función de DC y la velocidad relativa del avión-fluido, se hacen las siguientes indicaciones en referencia a la curva real, el objetivo de ésta optimización:

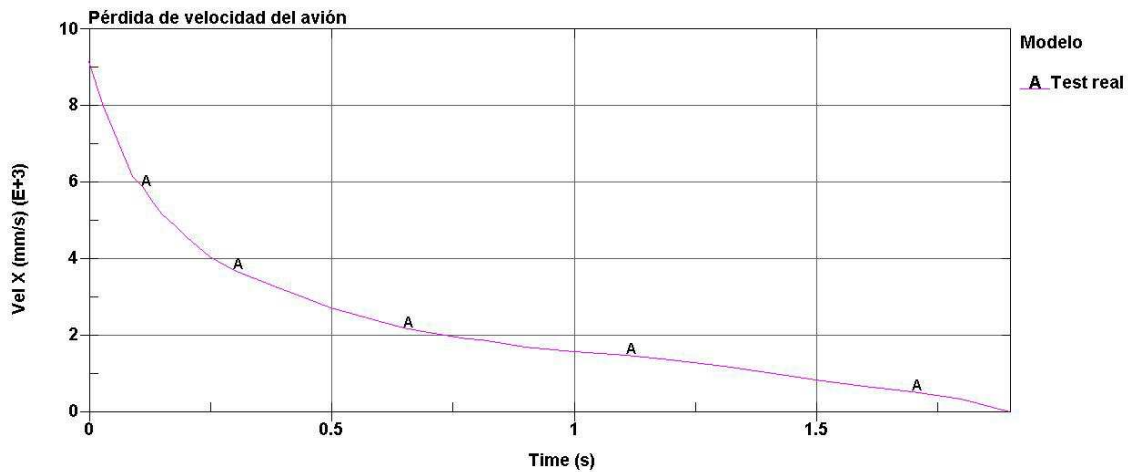


Figura 107 Histograma de velocidad real

- Se busca un coeficiente de fricción global maximizado al principio y muy bajo en los últimos compases del cálculo.
- La variación será exponencial simple debido a la configuración de la función μ , esto supone una curvatura asintótica con los ejes vertical y horizontal; esta particularidad impedirá de antemano un perfecto ajuste con la curva real.

Dicho lo anterior se comprueba con un valor $DC < 1$ como es $DC = 0.1$, además, empleando lo comprobado en casos anteriores, se define $FS = 0$ y $FD = 1$ para aproximarse lo máximo posible a la curva real.

\$#	fs	fd	dc	vc	vdc	penchk	bt	dt
\$#	0.000	1.000000	0.100000	0.000	0.010000	0	0.050000	1.0000E+20
\$#	sfs	sfm	sst	mst	sfst	sfmt	fsf	vsf
1.000000	1.000000	1.000000	0.000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000

Figura 108 Detalle de los parámetros de contacto

Resultado: Como precedía el estudio de la función $\mu = f(v_{rel}, DC)$, para $DC = 0.1$ se obtiene un valor constante y unitario de μ para todo el rango de velocidad. Se adjunta la curva del caso 'avión 15b' para dejar constancia de, que para el valor de DC antes mencionado, el comportamiento es prácticamente igual.

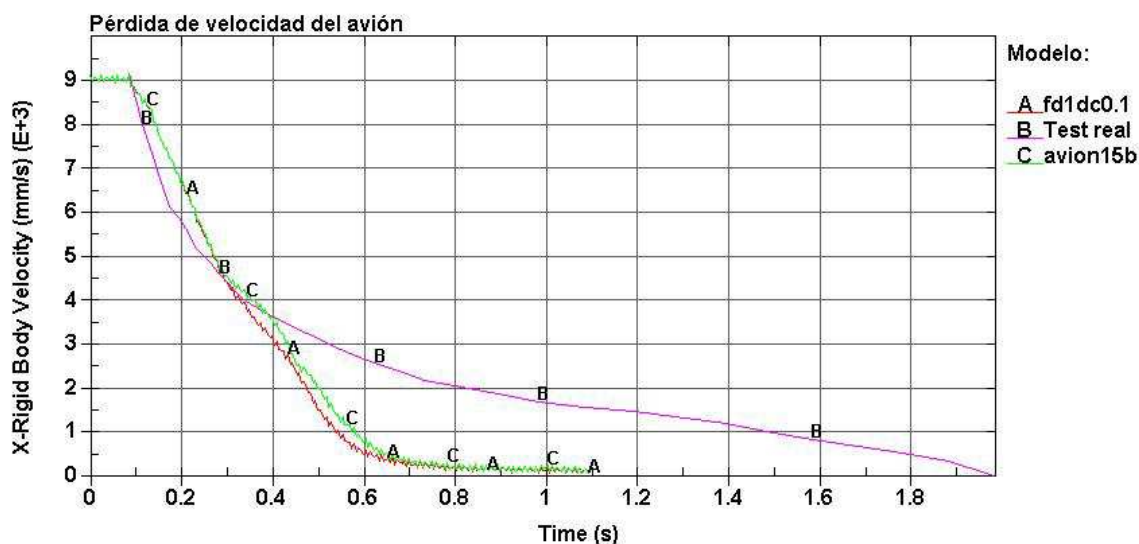


Figura 109 Comparativa de casos 'avion15b' y 'fd1dc0.1' con el caso real

A continuación se expone el muestreo realizado para determinar un valor válido de DC atendiendo a las dos premisas de la página anterior.

Tabla 3 Imagen de la función μ según DC y Velocidad relativa

Vrel mm/s	fd	fs	DC=0.1		DC=0.001		DC=0.0006		DC=0.0003		DC=0.0001	
			dc	μ	dc	μ	dc	μ	dc	μ	dc	μ
9000	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9999	0.0006	0.9942	0.0003	0.9328	0.0001	0.5934
8500	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9998	0.0006	0.9843	0.0003	0.9219	0.0001	0.5726
8000	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9997	0.0006	0.9692	0.0003	0.9093	0.0001	0.5507
7500	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9994	0.0006	0.9476	0.0003	0.8946	0.0001	0.5276
7000	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9991	0.0006	0.9300	0.0003	0.8775	0.0001	0.5034
6500	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9985	0.0006	0.9067	0.0003	0.8577	0.0001	0.4780
6000	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9975	0.0006	0.8867	0.0003	0.8347	0.0001	0.4512
5500	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9959	0.0006	0.8676	0.0003	0.8080	0.0001	0.4231
5000	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9933	0.0006	0.8464	0.0003	0.7769	0.0001	0.3935
4500	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9889	0.0006	0.8234	0.0003	0.7408	0.0001	0.3624
4000	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9817	0.0006	0.7984	0.0003	0.6988	0.0001	0.3297
3500	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9698	0.0006	0.7744	0.0003	0.6501	0.0001	0.2953
3000	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9502	0.0006	0.7497	0.0003	0.5934	0.0001	0.2592
2500	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.9179	0.0006	0.7254	0.0003	0.5276	0.0001	0.2212
2000	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.8647	0.0006	0.7067	0.0003	0.4512	0.0001	0.1813
1500	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.7769	0.0006	0.6876	0.0003	0.3624	0.0001	0.1393
1000	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.6321	0.0006	0.6751	0.0003	0.2592	0.0001	0.0952
500	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.3935	0.0006	0.6538	0.0003	0.1393	0.0001	0.0488
0	1	0	0.1000	1.0000	0.0010	0.0000	0.0006	0.6342	0.0003	0.0000	0.0001	0.0000

Si atendemos a la Tabla 3 Imagen de la función μ según DC y Velocidad relativa, salvo para valores muy pequeños de Vrel, el coeficiente μ mantiene un valor máximo, aproximadamente 1; esto ocurre para valores $DC < 1$. Hay que alcanzar valores $DC \ll 1$

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

para que el coeficiente actúe cómo se espera, reduciendo el factor μ de manera sensible cuando se reduce la V_{rel} . Por último destacar el comportamiento para $DC=1e-4$, empieza con un factor de fricción 0.59, presumiblemente más bajo de lo necesario para dibujar la curva real, por lo que $DC=1e-4$ sería un límite abierto del rango de valores DC .

Resultados: Se lanzan los tres casos y se comparan a los resultados de avion15b y la curva real.

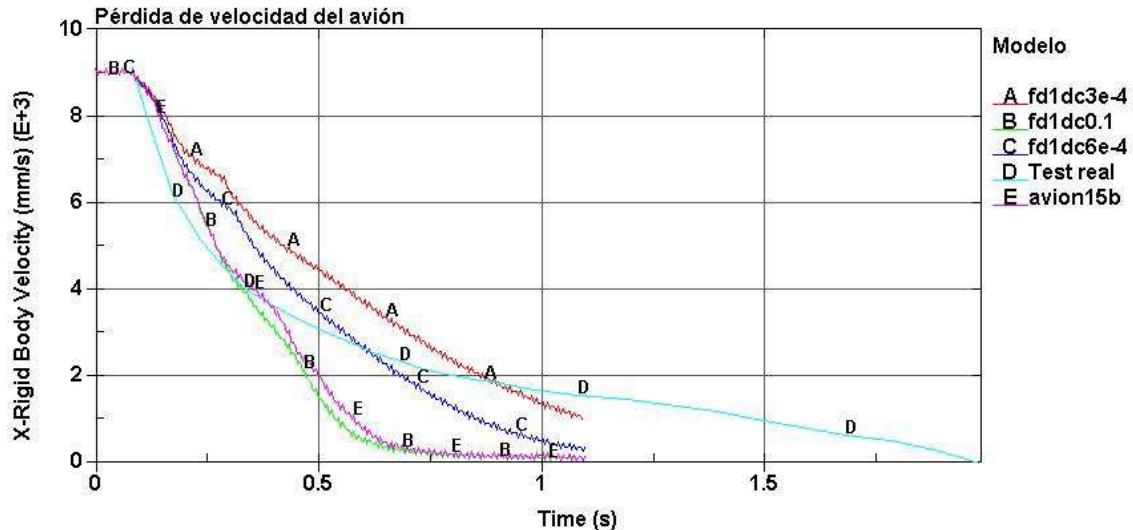


Figura 110 Comparativa con los casos 'dc6e-4' y 'dc3e-4'

Se observa la repercusión de DC en la curva de deceleración, la pendiente aumenta y para velocidades cercanas a cero aparece una cierta curvatura. Desafortunadamente, si se consigue una pendiente inicial semejante a la real (avión 15b y $DC=0.1$), la fricción se mantiene más tiempo y se alcanza velocidad nula más rápidamente que en la curva real; por el contrario, si se intenta conseguir una deceleración suave a largo plazo ($DC=6e-4$ y $DC=3e-4$), en los primeros estadios la deceleración es menor sin conseguir una fidelidad aceptable en los últimos estadios.

Por otro lado, si se atiende al desarrollo de la curva durante todo el proceso, se observa que el contacto no es capaz de modelizar el comportamiento real. Mediante los parámetros FS , FD y DC se regula la pendiente de la curva pero no su curvatura regresiva; observando la Figura 110 se ve la 'rigidez' de la fricción del contacto, la velocidad en los casos modelados desciende de manera constante, no se observa adecuación a la velocidad entre el avión y el agua.

CABECEO DEL AVIÓN.

Una vez estudiada la velocidad de los modelos simulados, se atenderá al desarrollo del cabeceo del avión mediante la herramienta *pid=7*, que aparece en la Figura 111, y los datos de cabeceo que expone el artículo [13].

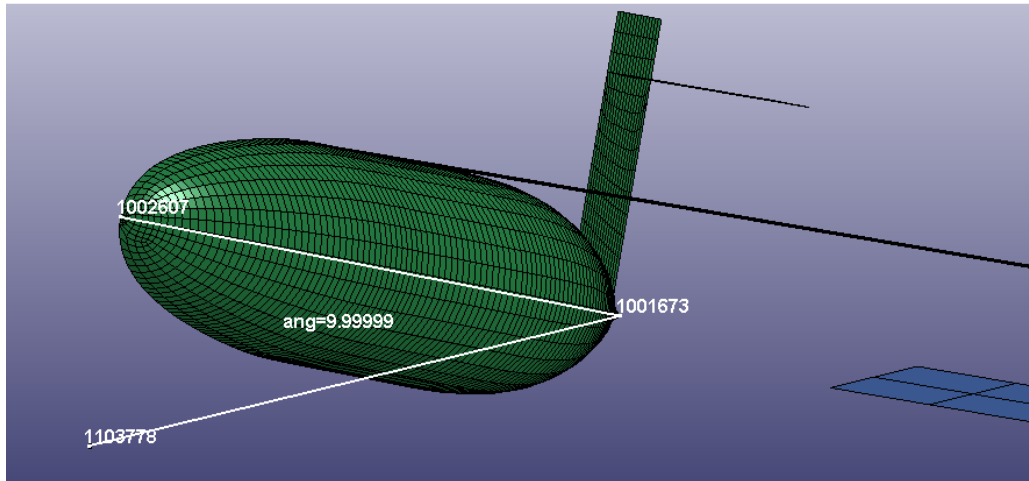


Figura 111 Herramienta de medición de cabeceo

El artículo [13] expone en su caso de PAM-CRASH® la importancia de las fuerzas de succión en los primeros estadios del amerizaje. Se basan en los resultados de E. E. McBride y L. J. Fisher en su artículo '*Experimental investigation of the effect of rear-fuselage shape on ditching behaviour*' de 1953 [11]. Según este estudio, el teorema de Bernoulli predice una diferencia de presión en el extremo posterior del fuselaje, una vez sumergido y durante los primeros instantes del impacto, que provoca una rotación del cuerpo de aproximadamente 30°, haciendo que el morro del avión se eleve sobre la superficie del agua, Figura 112. Por ello definen dos modelos alternativos para comparar, uno sin fuerzas de succión y otro con unas fuerzas externas que actúan en el momento del contacto con el fluido y empujan la cola del fuselaje. Tanto los datos del artículo [9], como los resultados del caso del artículo [13] se exponen en la figura siguiente, Figura 113.

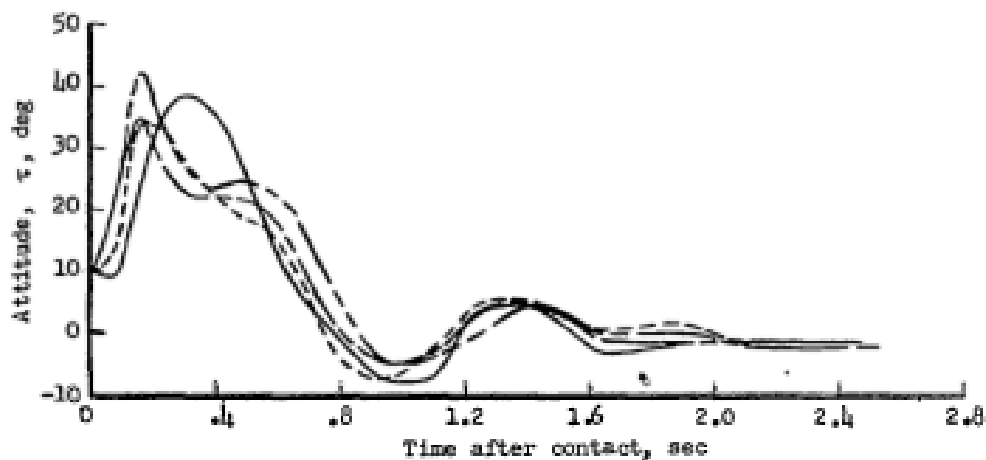


Figura 112 Curva de cabeceo en el artículo [11]

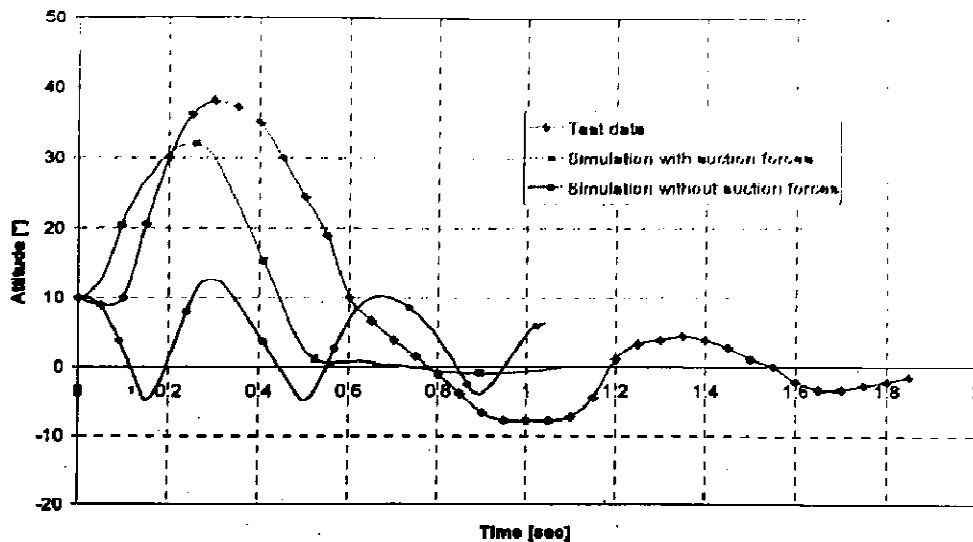


Figura 113 Curvas de cabeceo en el artículo [13]

Debido a la calidad de la imagen se procede a traspasar las curvas al LS-DYNA®, de este modo se mejora la visualización e identificación de estas y su comparación con los casos simulados. A continuación, en la Figura 114, se observa esta acción, recortando las curvas hasta los 1.07 segundos.

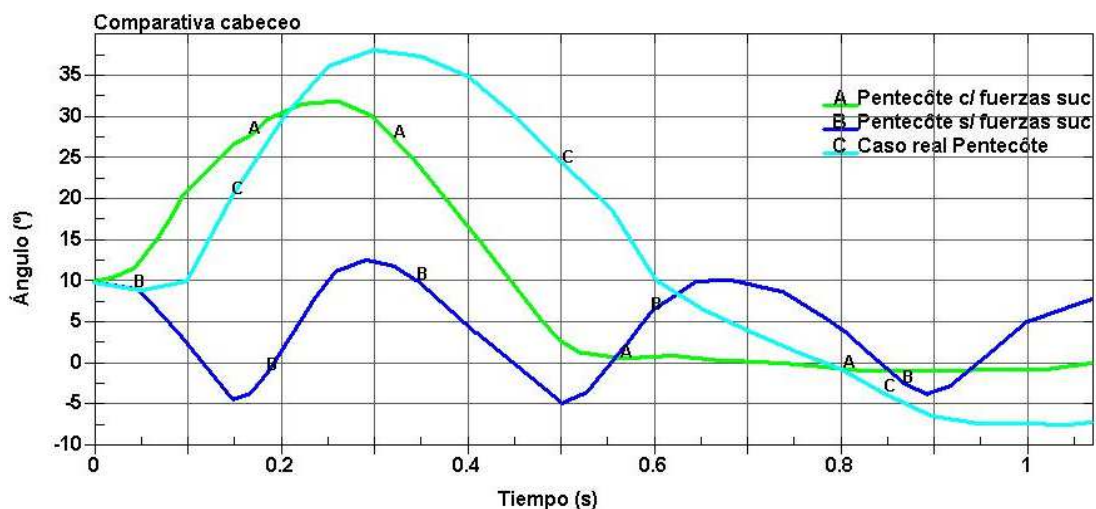


Figura 114 Representación en LS-DYNA® de las curvas de cabeceo

Como se comentaba previamente, según se relata en el artículo [13], en el caso experimental (curva Azul Claro), el avión comienza a rotar sobre su cola poco después de impactar (0.1 segundos) elevando el morro y dibujando un arco mayor que con el que acomete la superficie del agua, pasando de 10 a 38° aproximadamente. Con la simulación que incluye un equivalente a las fuerzas de succión (curva Verde), se consigue un comportamiento semejante, algo que no ocurre con la simulación restante (curva Azul Oscuro), la cual no tenía implementada fuerzas de succión en la cola del fuselaje.

Si se incluye la curva de cabeceo que produce la simulación efectuada con LS-DYNA®, en concreto para el caso que mejor respondía frente al comportamiento real de la velocidad ($DC=6e-4$), la comparativa queda como sigue (Figura 115):

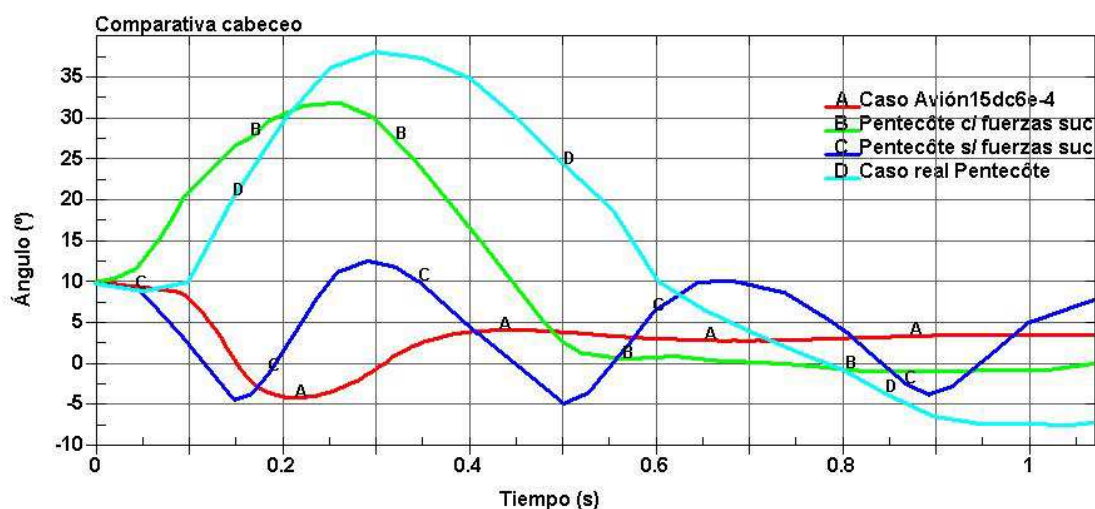


Figura 115 Comparativa de las curvas de cabeceo

Se observa que el caso simulado con LS-DYNA® presenta un cabeceo menor que en los resultados del artículo [13]. No se producen las fuerzas por inmersión que registraron Fisher y McBride, generando un momento de inercia que lanza el avión contra la superficie de agua, en lugar de elevarlo sobre ella. Se obtiene una inmersión semejante a la del caso del artículo [13] sin fuerzas de succión, sin embargo en el caso LS-DYNA® la ondulación del agua no es tan acusada y el cabeceo desaparece tras lo que se puede denominar un ciclo; sería bueno estudiar en detalle las condiciones en las que se modeló el modelo en PAM-CRASH®, de éste modo se podría estudiar qué provoca la diferencia de comportamiento entre ambos softwares: fuerza de cohesión entre partículas SPH, funcionamiento de los contactos, amortiguamiento, etc.

5.1.3 CONCLUSIONES

En este apartado se ha comparado el caso de *ditching* mediante SPH, realizado por Pentecôte y Kohlgrüber mediante el lenguaje de simulación PAM-CRASH®, los resultados experimentales de McBride y Fisher que recopilaron para la NACA (Comité Consultivo Nacional de Aeronáutica, en inglés) y simulaciones propias, realizadas también con tecnología SPH a través del programa LS-DYNA®.

Primeramente, hay que comentar las carencias del SPH para simular el comportamiento viscoso de un fluido a bajas resoluciones de malla. Mientras que en el caso de la cuña, donde la viscosidad del fluido no era primordial, se obtuvieron valores muy precisos con respecto al caso real, aquí el SPH no simula correctamente la interacción. Si atendemos a los resultados registrados por la NACA, que aparecen en la Figura 112, tanto el SPH de PAM-CRASH® como el de LS-DYNA® son incapaces de generar las fuerzas de succión y, en el caso de Pentecôte y Kohlgrüber, se acude a fuerzas externas, para conseguir el efecto de elevación del morro del fuselaje. Los desarrollos en incompresibilidad y discontinuidad (ISPH y DSPH) para el SPH son los encargados de pulir este fenómeno, dejando a un lado la mejora de resultados que conlleva una malla de mayor calidad.

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

En el aspecto de la velocidad los resultados son ligeramente mejores, consiguiéndose gradientes de velocidad aproximados a la deceleración real, según se mostraba en la Figura 110 de la página 77. El inconveniente reside en la falta de adaptación de la fricción del contacto; este aspecto no puede actuar como viscosidad del medio, con lo que no presenta una oposición al movimiento adecuada a la velocidad relativa entre entes en contacto. Esto se observaba al estudiar la curvatura de las líneas de los casos simulados por LS-DYNA® en dicha Figura 110. Sería interesante investigar si la respuesta a la velocidad relativa mejora con una mayor densidad de partículas SPH.

6 CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

6.1 CONCLUSIONES EXTRAÍDAS DEL PRESENTE TRABAJO

- El cálculo de eventos por elementos finitos permite, de manera sencilla, predecir a grandes rasgos eventos físicos que, de otro modo, serían muy difíciles de estudiar.
- Cuanto más refinada sea la malla del caso, mejores resultados proporcionará.
- Calcular la interacción de un fluido y una estructura, un caso FSI, precisa de una capacidad de computación considerable. Los grandes cálculos de acoplado conllevan tal cantidad de cálculo que un equipo corriente no es capaz de ejecutarlo.
- El empleo de *shells* y material teórico rígido agiliza los resultados alcanzando unos resultados cinemáticos muy precisos, sin embargo, conllevan vibraciones que pueden falsear los registros dinámicos de elementos deformables de sus proximidades.
- A la hora de estudiar efectos fluidodinámicos macroscópicos, las tecnologías FSI de las que dispone el programa LS-DYNA® (ALE, SPH, en concreto) pueden simularlos con notables resultados.
- Aún cuando surgieron en la misma época (primeros años de la década de los 70), la tecnología SPH presenta diversas vías de desarrollo y mejora, mientras que la tecnología ALE mantiene, casi en su totalidad, la misma formulación que en sus orígenes.
- A igual grado de detalle de malla, más ventaja en tiempo frente a resultados obtiene la tecnología ALE frente a la tecnología SPH.
- La tecnología SPH, a la hora de simular un fenómeno, proporciona mayor facilidad de implementación de casos.
- La tecnología SPH presenta limitaciones a la hora de simular esfuerzos viscosos. La formulación estándar y los medio de contacto habituales no consiguen simular correctamente la viscosidad de un fluido como el agua.
- Debido a la capacidad de ajuste del LS-DYNA®, es conveniente basar una simulación de gran calado en experiencias extraídas de una simulación más sencilla, comparando ésta con datos experimentales.
- No ha sido posible establecer una comparativa de calidad entre PAM-CRASH® y LS-DYNA® debido a la falta de información de las condiciones del cálculo en PAM-CRASH®.

6.2 FUTUROS TRABAJOS

- Investigar la tecnología Mesh free-Galerkyn para poder establecer una comparativa con las tecnologías de ALE y SPH.
- Profundizar en las mejoras que suponen las tecnologías DSPH e ISPH para ver su capacidad.
- Emplear los parámetros heredados del caso de la cuña para calcular casos de caídas libres sobre agua. Cálculo estructural, etc.
- Desarrollar un caso de amerizaje análogo con ABAQUS® para comparar éste y LS-DYNA®.
- Desarrollar el caso de la cuña con elementos deformables para estudiar la capacidad de cálculo de las presiones.
- Estudiar la relación entre densidad de malla SPH y efecto viscoso del material.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. ANSYS Inc. Matuska D. A. "HULL USERS MANUAL" en: *ANSYS AUTODYN* ® [CD-ROM]. Junio 1984. Pittsburg, Estados Unidos.
2. Gabarró Hermanos S.A. "CARACTERÍSTICAS GARNICA PLYWOOD" en: *Catálogo de productos Gabarró Hermanos S.A.* Octubre 2011. Sabadell, Barcelona.
(www.gabarro.com).
3. Hart, C.W.; Amsden, A.A.; Cook, J.L.; "AN ARBITRARY LAGRANGIAN-EULERIAN COMPUTING METHOD FOR ALL FLOW SPEEDS" en: *Journal of Computational Physics*, Volumen 14, Artículo 3, Marzo 1974, Pages 227-253, ISSN 0021-9991, 10.1016/0021-9991(74)90051-5.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0021999174900515>)
4. Jackson, K. E.; Fuchs, Y. T. "COMPARISION OF ALE AND SPH SIMULATIONS OF VERTICAL DROP TESTS OF A COMPOSITE FUSELAGE SECTION INTO WATER" en: *Décima conferencia internacional de usuarios de LS-DYNA*. Junio 2008. Dearborn, Estados Unidos.
5. Livermore Software Technology Corporation. Bala, S. *CONTACT MODELING IN LS-DYNA*®. Agosto 2007. Livermore, Estados Unidos.
6. Livermore Software Technology Corporation. Hallquist, John O. *LS-DYNA*® THEORY MANUAL. Mayo 2006. Livermore, Estados Unidos.
7. Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Support. *CONTACT MODELING IN LS-DYNA* [en línea]. Septiembre 2008. Livermore, Estados Unidos.
8. Livermore Software Technology Corporation. *LS-DYNA*® KEYWORD USER'S MANUAL, VOLUME I. Versión 971, Mayo 2007. Livermore, Estados Unidos.
9. Livermore Software Technology Corporation. Souli, M. *LS-DYNA ADVANCED COURSE IN ALE AND FLUID/STRUCTURE COUPLING*. Revisión 116. Marzo 2001. Livermore, Estados Unidos.
10. Livermore Software Technology Corporation. Weimar, K. *LS-DYNA USER'S GUIDE*. Revisión 1.19. Septiembre 2001. Livermore, Estados Unidos.
11. National Advisory Committee for Aeronautics. McBride, E. E.; Fisher L. J. *EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF REAR-FUSELAGE SHAPE ON DITCHING BEHAVIOR*. Abril 1953. Hampton, Estados Unidos.
12. National Aeronautics and Space Administration. Jackson K. E. et al. *WATER IMPACT TEST AND SIMULATION OF A COMPOSITE ENERGY ABSORBING FUSELAGE SECTION*. Marzo 2005. Hampton, Estados Unidos.
13. Pentecôte, N.; KohlGrüber, D. *CRASH ON WATER: A MULTI-PHYSICS PROBLEM*. Mayo 2008. Stuttgart, Alemania.
14. Tutt, B. A.; Taylor, A. P. "THE USE OF LS-DYNA TO SIMULATE THE WATER LANDING CHARACTERISTICS OF THE SPACE VEHICLES" en: *Octava conferencia internacional de usuarios de LS-DYNA*. 2004. Detroit, Estados Unidos.
15. Universidad de Puerto Rico. Huertas-Ortecho, C. A. *ROBUST BIRD-STRIKE MODELING USING LS-DYNA*. Junio 2006. Mayagüez, Puerto Rico.
16. Yettou, E. M.; Desrochers, A. y Champoux, Y. *EXPERIMENTAL STUDY ON THE WATER IMPACT OF A SYMMETRICAL WEDGE*. Septiembre 2005. Quévec, Canadá.

8 ANEXO: CÓDIGOS DE CÁLCULOS

8.1 CÓDIGO TIPO PARA UN CASO DE CUÑA MEDIANTE ALE

Caso ALE 18 mm

```
$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PREPOST 3.0(Beta) - 27Aug2009(15:11)
$# Created on Mar-29-2011 (17:12:20)
*KEYWORD
*TITLE
$# title
ALE 29.03.11.K mm,s,Tn
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
$#      sid      idtype      gpname
      1          1
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
$#      sid      idtype      gpname
      2          1
*BOUNDARY_NON_REFLECTING
$#      ssid      ad      as
      1      0.000      0.000
*BOUNDARY_SPC_SET
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
      1          0          0          1          0          1          0          1
*BOUNDARY_SPC_SET
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
      2          0          0          0          1          1          1          1
*BOUNDARY_SPC_SET
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
      3          0          1          0          0          0          1          1
*BOUNDARY_SPC_NODE
$#      nid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
      300000      0          1          1          0          0          0          0
      355131      0          1          1          0          0          0          0
      354327      0          1          1          0          0          0          0
      305976      0          1          1          0          0          0          0
*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID
$#      slave      master      sstyp      mstyp      nquad      ctype      direc      mcoup
      2          1          2          0          2          4          3          1
$#      start      end      pfac      fric      frcmin      norm      normtyp      damp
      0.0001.0000E+10 0.100000 0.000 0.500000 1 0 1
$#      cq      hmin      hmax      ileak      pleak      lcidpor      nvent      blockage
      0.000 0.000 0.000 0 0.010000 0 0 0
$#      iboxid      ipenchk      intforc      ialesof      lagmul      pfacmm      thkf
      0          0          0          0          0.000 0 0.000
*CONTROL_ALE
$#      dct      nadv      meth      afac      bfac      cfac      dfac      efac
      3          1          1 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$#      start      end      aafac      vfact      prit      ebc      pref      nsidebc
      0.0001.0000E+20 1.000000 1.0000E-6 0 0 0.000 0
*CONTROL_HOURLGLASS
$#      ihq      qh
      1 1.0000E-4
*CONTROL_TERMINATION
$#      endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
      0.100000 0 0.000 0.000 0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#      dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode      ms1st
      0.000 0.900000 0 0.000 0.000 0 0 0
$#      dt2msf      dt2mslc      imsc1
      0.000 0 0
*DAMPING_PART_STIFFNESS
$#      pid      coef
      4 0.010000
*DATABASE_BNDOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      0.001000 3 0 1
*DATABASE_ELOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      0.001000 3 0 1
*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      0.001000 3 0 1
*DATABASE_MATSUM
```

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

```

$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.001000      3      0      1
*DATABASE_NCFORC
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.001000      3      0      1
*DATABASE_RCFORC
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.000      2      0      1
*DATABASE_SPCFORC
$#      dt      binary      lcur      ioopt
0.001000      3      0      1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
0.001000      0      0      0      0
$#      ioopt
0
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$#      neiph      neips      maxint      strflg      sigflg      epsflg      rltflg      engflg
0      0      3      0      1      1      1      1
$#      cmpflg      ieverp      beamip      dcomp      shge      stssz      n3thdt      ialemat
0      1      0      1      1      1      2      1
$#      nintsld      pkp_sen      sclp      unused      msscl      therm      iniout      iniout
0      0      1.000000      0      0      0STRESS      STRESS
*DATABASE_HISTORY_SHELL
$#      id1      id2      id3      id4      id5      id6      id7      id8
350788      351112      351500      351952      352468      352972      353608      354308
*DATABASE_HISTORY_SHELL
$#      id1      id2      id3      id4      id5      id6      id7      id8
355062      355822      356582      357317      0      0      0      0
*DATABASE_FSI_SENSOR
$#      dt
5.0000E-4
$#      id      nid      segmid      offset
1      306734      350788      0.000
2      306334      351112      0.000
3      306893      351500      0.000
4      312460      351952      0.000
5      312642      352468      0.000
6      305918      352972      0.000
7      306967      353608      0.000
8      354221      354308      0.000
9      305681      355062      0.000
10      306205      355822      0.000
11      307400      356582      0.000
12      350667      357317      0.000
13      306460      350557      0.000
*DEFINE_CURVE
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
1      0      1.000000      1.000000      0.000      0.000      0
$#      al      ol
0.000      9800.000000
100.000000      9800.000000
*ELEMENT_SOLID
$#      eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
1363347      2      1363029      1363030      1363086      1363085      1366165      1366166      1366222      1366221
[...]
1569046      1      1579355      1579356      1579412      1579411      1366107      1366108      1366164      1366163
*ELEMENT_SHELL
$#      eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
300000      3      300000      300001      300002      300003      0      0      0      0
[...]
363346      3      354343      354342      354368      354367      0      0      0      0
*EOS_GRUNEISEN_TITLE
EOS_agua
$#      eosid      c      s1      s2      s3      gamao      a      e0
1      1.4830E+6      1.750000      0.000      0.000      0.280000      3.000000      0.001240
$#      v0
1.000000
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL
$#      eosid      c0      c1      c2      c3      c4      c5      c6
2      0.000      0.000      0.000      0.000      0.400000      0.400000      0.000
$#      e0      v0
0.001510      1.000000
*HOURLGLASS
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc      qw
1      1      1.0000E-4      1      1.500000      0.060000      0.100000      0.100000

```

```

*INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY
$#   pid      vx      vy      vz      vxr      vyr      vzr
    3      0.000      0.000-5300.0000      0.000      0.000      0.000
*LOAD_BODY_Z
$#   lciddr      sf      xc      yc      zc      cid
    1      1.000000      0      0.000      0.000      0.000      0
*MAT_NULL
$#   mid      ro      pc      mu      terod      cerod      ym      pr
    1      1.0000E-9-1.000E-20      1.0030E-9      0.000      0.000      0.000      0.300000
*MAT_NULL_TITLE
Aire
$#   mid      ro      pc      mu      terod      cerod      ym      pr
    21.2200E-12-1.000E-201.7700E-11      0.000      0.000      0.000      0.300000
*MAT_RIGID
$#   mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
    34.6700E-10      2000.0000      0.300000      0.000      0.000      0.000
$#   cmo      con1      con2
    0.000      0      0
$#   lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
    0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*MAT_ELASTIC
$#   mid      ro      e      pr      da      db      not used
    44.6700E-10      2000.0000      0.300000      0.000      0.000      0
*NODE
$#   nid      x      y      z      tc      rc
    300000      599.9998779      -4.7588645e-005      279.7843323      0      0
[...]
1579412      1600.0000000      999.9949341      -18.1818275      0      0
*PART
$# title
Agua
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
    1      1      1      1      1      0      0      0
*PART
$# title
Aire
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
    2      1      2      2      1      0      0      0
*PART_INERTIA
$# title
Box
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
    3      3      3      0      0      0      0      0
$#   xc      yc      zc      tm      ircs      nodeid
    900.00000      200.00000      186.52299      0.023519      0      0
$#   ixx      ixy      ixz      iyy      iyz      izz
    574.01898      -0.836566      0.162982      822.03998-109.57400      1191.3199
$#   vtx      vty      vtz      vrz      vry      vrz
    0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*PART
$# title
Transductores
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
    4      4      4      0      0      0      0      0
*SECTION_SOLID_ALE
$#   secid      elform      aet
    1      11      3
$#   afac      bfac      cfac      dfac      start      end      aafac
    0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*SECTION_SHELL
$#   secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
    3      2      0.833300      3      1      0      0      1
$#   t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
    1.000000      1.000000      1.000000      1.000000      0.000      0.000      0.000      0
*SECTION_SHELL_TITLE
Box
$#   secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
    4      2      0.833333      3      3      0      0      1
$#   t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
    19.000000      19.000000      19.000000      19.000000      0.000      0.000      0.000      0
*SET_NODE_LIST
$#   sid      da1      da2      da3      da4
    1      0.000      0.000      0.000      0.000
$#   nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
    1363029      1363030      1363031      1363032      1363033      1363034      1363035      1363036
[...]
1576325      1576326      1576327      1576328      1576329      1576330      1576331      1576332

```

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

```

*SET_NODE_LIST
$#      sid      da1      da2      da3      da4
      2      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
      1406933      1406934      1406935      1406936      1406937      1406938      1406939      1406940
[ ... ]
      1410061      1410062      1410063      1410064      1410065      1410066      1410067      1410068
*SET_NODE_LIST
$#      sid      da1      da2      da3      da4
      3      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
      1363029      1363085      1363141      1363197      1363253      1363309      1363365      1363421
[ ... ]
      1579020      1579076      1579132      1579188      1579244      1579300      1579356      1579412
*SET_PART_LIST
$#      sid      da1      da2      da3      da4
      1      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
      1          2          0          0          0          0          0          0
*SET_SEGMENT
$#      sid      da1      da2      da3      da4
      1      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
      1406711      1406710      1406654      1406655      0.000      0.000      0.000      0.000
[ ... ]
      1544866      1548002      1548003      1544867      0.000      0.000      0.000      0.000
*SET_SEGMENT
$#      sid      da1      da2      da3      da4
      2      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
      306113      305753      306126      306112      0.000      0.000      0.000      0.000
[ ... ]
      300940      300941      300981      300980      0.000      0.000      0.000      0.000
*END

```

8.2 CÓDIGO TIPO PARA UN CASO DE AMERIZAJE MEDIANTE SPH.

Caso avion15b_0_6_0.k

```

$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 3.1 (Beta) - 19Oct2010(10:05)
$# Created on Feb-18-2012 (23:18:45)
*KEYWORD
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*BOUNDARY_SPC_SET
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
      101         0         0         0         1         1         1         0
*SET_NODE_LIST_TITLE
NODESET(SPC) 101
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      101      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
      1000212      1000172      1001912         0         0         0         0         0
*BOUNDARY_SPC_NODE
$#      nid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
      1103762         0         0         0         1         1         0         1
      1103758         0         0         0         1         1         0         1
      1103756         0         0         0         1         1         0         1
      1103761         0         0         0         1         1         0         1
*BOUNDARY_SPC_SET
      102         0         0         0         1         1         1         0
*SET_NODE_LIST
      102      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
      4101      4098      4097      4100      4104      4103      4107      4106
      4110      4109      4113      4112      4116      4115      4119      4118
[ ... ]
      9151      9152         0         0         0         0         0         0
*BOUNDARY_SPC_SET
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
      103         0         0         1         0         1         0         1
*SET_NODE_LIST_TITLE
NODESET(SPC) 103
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      103      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
      3830      3829      3831      3832      3834      3833      3836      3835
[ ... ]
      6483      6484      6485      6486      6487      6488      6489      6490
      6491      6492         0         0         0         0         0         0
*BOUNDARY_SPC_SET
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
      104         0         1         0         0         0         1         1
*SET_NODE_LIST_TITLE
NODESET(SPC) 104
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      104      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
      3869      3872      3871      3870      4399      4402      4401      4400
[ ... ]
      7695      7974      8152      8403      8404      8699      8875      9051
*BOUNDARY_SPH_SYMMETRY_PLANE
$#      vtx      vty      vtz      vhx      vhy      vhz
      0.000      0.000      1.000000      0.000      0.000      0.000
*SET_NODE_LIST
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      2         0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
      1002946      1002947      1002948      1002949      1002950      1002951      1002952      1002953
[ ... ]
      1061106      1061107      1061108      1061109      1061110      1061111      1061112      1061113
      1061114      1061115      1061116      1061117      1061118      1061119      1061120      1061121
*SET_NODE_LIST_TITLE
NODESET(SPC) 15
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      15      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
      1001673      1000224      1000044         0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      1         0.000      0.000      0.000      0.000MECH

```

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

```

$#      pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
        3          0          0          0          0          0          0          0
*SET_SEGMENT
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
        2      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
      8442      7993      7992      8440      0.000      0.000      0.000      0.000
[...]
      4935      4936      4934      4933      0.000      0.000      0.000      0.000
*PART_INERTIA
$# title
Plane
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
        3          3          3          0          0          0          0          0
$#      xc      yc      zc      tm      ircs      nodeid
    141.97885  249.05002-39.808601  0.005670      0      0
$#      ixx      ixy      ixz      iyy      iyz      izz
    28.413500-67.525597 -1.157520  399.44199 -0.387251  420.33401
$#      vtx      vty      vtz      vrz      vry      vrz
        0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*SECTION_SHELL
$#      secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
        3          2      0.833300      3          1          0          0          1
$#      t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
    0.100000  0.100000  0.100000  0.100000      0.000      0.000      0.000      0
*MAT_RIGID
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
        3  7.8600E-9  210.00000  0.300000  0.000      0.000      0.000
$#      cmo      con1      con2
        0.000      0      0
$#      lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
        0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*PART
$# title
Agua_lag
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
        5          5          6          6          0          0          0          0
*SECTION_SOLID
$#      secid      elform      aet
        5          1          0
*MAT_NULL
$#      mid      ro      pc      mu      terod      cerod      ym      pr
        6  1.0000E-9-1.000E+20  1.0030E-9      0.000      0.000      0.000      0.300000
*EOS_GRUNEISEN
$#      eosid      c      s1      s2      s3      gamao      a      e0
        6  1.4830E+6  1.750000      0.000      0.000      0.280000  3.000000  0.001240
$#      v0
    1.000000
*PART
$# title
Agua_sph
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
        6          6          6          6          6          0          0          0
*SECTION_SPH
$#      secid      cs1h      hmin      hmax      sphini      death      start
        6  1.200000  0.200000  2.000000      0.0001.0000E+20      0.000
*HOURLGLASS
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc      qw
        6          1  1.0000E-4      1  1.500000  0.060000  0.100000  0.100000
*PART
$# title
Guia
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
        7          3          3          0          0          0          0          0
*MAT_NULL
$#      mid      ro      pc      mu      terod      cerod      ym      pr
        5  1.0000E+9-1.000E+20  1.0030E-9      0.000      0.000      0.000      0.300000
*CONSTRAINED_EXTRA_NODES_NODE
$#      pid      nid
        3      1103773
        3      1103774
*CONSTRAINED_JOINT_CYLINDRICAL_ID
$#      jid      title
        1
$#      n1      n2      n3      n4      n5      n6      rps      damp
    1103773  1103763  1103774  1103769      0          0  1.000000      0.000

```



```

*ELEMENT_SOLID
$#   eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
    1        5        1        2        3        4        5        6        7        8
[... ]
    6299      5      697      8799      9151      8975      699      8798      9150      8974
    6300      5      8624      8800      9152      8976      697      8799      9151      8975
*ELEMENT_SHELL
$#   eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
    6318      3 1002796 1002782 1002813 1002828      0      0      0      0
[... ]
    1103763    7 1103779 1103778 1103777 1103780      0      0      0      0
*ELEMENT_SPH
$#   nid      pid      mass
    1002946    6 1.5624999e-005
[... ]
    1061120    6 1.5624999e-005
    1061121    6 1.5624999e-005
*NODE
$#   nid      x      y      z      tc      rc
    1      100.0000000    -200.0009308    -400.0000305      0      0
[... ]
    1103780    757.3161621    42.6456184    -2.7590318      0      0
*CONTROL_ENERGY
$#   hgen      rwen      slnten      rylen
    2          2          2          2
*CONTROL_SPH
$#   ncbs      boxid      dt      idim      memory      form      start      maxv
    1          1 11.0000E+20      3      150      5      0.0001.0000E+15
$#   cont      deriv      iact
    0          0          0
*CONTROL_SUBCYCLE
*CONTROL_TERMINATION
$#   endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
    1.100000      0      0.000      0.000      0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#   dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode      mslst
    0.000      0.900000      0      0.000      0.000      0      0      0
$#   dt2msf      dt2mslc      imscl
    0.000      0      0
*DATABASE_GLSTAT
$#   dt      binary      lcur      ioopt
    0.001000      1      0      1
*DATABASE_NCFORC
$#   dt      binary      lcur      ioopt
    0.001000      1      0      1
*DATABASE_RCFORC
$#   dt      binary      lcur      ioopt
    0.001000      1      0      1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#   dt      lcdt      beam      npltc      psetid
    0.005000      0      0      0      0
$#   ioopt
    0
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$#   neigh      neips      maxint      strflg      sigflg      epsflg      rltflg      engflg
    0          0      3      0      1      1      1      1
$#   cmpflg      ieverp      beamip      dcomp      shge      stssz      n3thdt      ialemat
    0          1      0      1      1      1      2      1
$#   nintslld      pkp_sen      sclp      unused      msscl      therm      intout      nodout
    0          0 1.000000      0      0      0      OSTRESS      STRESS
*DEFINE_BOX
$#   boxid      xmn      xmx      ymn      ymx      zmn      zmx
    1      0.000 10100.000-450.00000 100.00000-450.00000      0.000
*DEFINE_COORDINATE_NODES
$#   cid      n1      n2      n3      flag      dir
    1 1003089 1003233 1003088      0X
*DEFINE_CURVE
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
    1          0 1.000000 1.000000 0.000 0.000      0
$#   al      ol
    0.000      1.000000
    20.000000 1.000000
*INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY
$#   pid      vx      vy      vz      vxr      vyr      vzr
    3 9140.0000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*LOAD_BODY_Y
$#   lcid      sf      lciddr      xc      yc      zc      cid

```

MODELIZACIÓN DE DIVERSOS IMPACTOS CONTRA EL AGUA USANDO LS-DYNA

```

1 9800.0000 0 0.000 0.000 0.000 0
*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_MPP_ID
$# cid title
1
$# ignore bucket lcbucket ns2track inititer parmax unused cparm8
0 200 0 3 2 1.000500 0 0
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
6 3 3 3 0 0 1 0
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.000 0.600000 0.050000 0.000 0.010000 0 0.050000 1.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
$# soft sofsc lcidab maxpar sbopt depth bsort frcfrq
1 0.100000 0 1.025000 2.000000 2 0 1
$# penmax thkopt shlthk snlog isym i2d3d sldthk sldstf
0.000 0 0 0 0 0 0 0.000
$# igap ignore dprfac dtstif unused unused flangl
1 0 0.000 0.000 0 0 0.000
*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_MPP_ID
$# cid title
2
$# ignore bucket lcbucket ns2track inititer parmax unused cparm8
0 200 0 3 2 1.000500 0 0
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
2 2 4 0 0 0 0 0
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.000 0.000 0.000 0.000 1.000000 0 0.000 1.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
$# soft sofsc lcidab maxpar sbopt depth bsort frcfrq
1 0.100000 0 1.025000 2.000000 2 0 1
$# penmax thkopt shlthk snlog isym i2d3d sldthk sldstf
0.000 0 0 0 0 0 0 0.000
$# igap ignore dprfac dtstif unused unused flangl
1 0 0.000 0.000 0 0 0.000
*RIGIDWALL_PLANAR
$# nsid nsidex boxid offset birth death rwksf
2 0 0 0.000 0.000 0.000 0.000
$# xt yt zt xh yh zh fric wvel
0.000-600.00000-600.00000 424.26401-600.00000-600.00000 0.000 0.000
2 0 0 0.000 0.000 0.000 0.000
10100.000-600.00098 0.000 5041.1001-600.00098 0.000 0.000
*END

```